

Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia

Sandra Katerine Arismendy Vidales

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería ambiental

Medellín, Colombia

2020

**Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de
yacimientos mineros en Colombia**

Sandra Katerine Arismendy Vidales

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director (a): Diana Marcela Muñoz Nieto

Ingeniera química, Magíster en Ingeniería Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería ambiental

Medellín, Colombia

2020

*Dedico este
trabajo a mi familia, principalmente a
mis padres que han sido un pilar
fundamental en mi formación como
profesional y ser humano, quienes
siempre me han brindado consejos,
apoyo, ánimo y compañía en los
momentos más difíciles de mi vida.
Quienes siempre han confiado en mí y
me han dado su amor y que por esa
razón me han motivado día a día a
culminar exitosamente cada proyecto que
emprendo, sin importar las dificultades.*

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por estar siempre conmigo, por guiarme y levantarme de las diferentes dificultades que se presentan en la vida, por darme la capacidad y sabiduría para realizar este proyecto.

A mi familia y amigos por la paciencia que han sabido tener conmigo, por su comprensión y apoyo constante.

A mi asesora Diana Marcela Muñoz Nieto por sus orientaciones en el desarrollo de esta investigación, por sus conocimientos, acompañamiento y respeto brindado durante la elaboración de este trabajo.

A la profesora Gloria María Doria Herrera por su acompañamiento en el inicio de esta investigación.

Y a la Universidad Nacional abierta y a Distancia UNAD por las oportunidades, experiencias y conocimientos adquiridos; de igual manera, a todas las personas que fueron partícipes de este proceso de formación.

Índice de contenido

Índice de figuras	16
Índice de tablas	17
RESUMEN	18
Capítulo 1. Generalidades.....	20
1.1. Introducción	21
1.2. Planteamiento del problema.....	24
1.3. Justificación	27
1.4. Marco conceptual	29
1.4.1. Que es la minería.....	29
1.4.2. Actividad minera en Colombia	32
1.4.3. Impacto ambiental y social por parte de la minería	38
1.5. Marco legal	45
1.6. Objetivos	50
1.6.1. Objetivo general.....	50
1.6.2. Objetivos específicos	50
Capítulo 2. Descripción y Análisis	51
2.1. Drenaje Ácido de Mina (DAM).....	52

2.1.1.	Definición de drenaje ácido de mina	52
2.1.2.	Características del Drenaje Ácido de Mina	56
2.1.3.	Mecanismos y fuentes de formación	60
2.1.4.	Posibles impactos y efectos del Drenaje Ácido de Mina sobre el medio ambiente 64	
2.2.	Manejo y control del DAM	70
2.2.1.	Métodos de predicción y prevención	70
2.2.2.	Predicción	70
2.2.3.	Prevención	72
2.2.4.	Tratamiento para el DAM	75
2.2.5.	Tratamientos activos	76
2.2.6.	Tratamientos pasivos	82
2.3.	Casos de DAM en algunos distritos mineros del país	87
2.3.1.	Bacterias reductoras de sulfato (BSR).....	87
2.3.2.	Biomasa de absorción	89
2.3.3.	Compost de champiñón como enmienda orgánica	91
2.3.4.	Sistemas reductores de sulfato y productores de alcalinidad.....	92
2.3.5.	Humedales construidos.....	94
2.3.6.	Oxidación química.....	96
2.4.	Análisis de impactos ambientales.....	98

2.5. Conclusiones	110
2.6. Recomendaciones	113
Referencias bibliográficas	114

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de explotaciones mineras	29
Figura 2. Esquema del ciclo de desarrollo minero	30
Figura 3. Etapas de la minería	31
Figura 4. Mapa de depósitos de minerales de Colombia	36
Figura 5. Drenaje minero según pH	52
Figura 6. Fuentes productoras de DAM.....	60
Figura 7. Factores y dinámicas del DAM	63
Figura 8. Criterios de diseño y gestión del riesgo del DAM	74
Figuro 9. Proceso de neutralización con cal convencional.....	78
Figura 10. Formación de aguas acidas de mina.....	100
Figura 11. Etapas de la formación de aguas acidas	102
Figura 12. Factores influyentes en la generación de DAM	106

Índice de tablas

Tabla 1: impactos ambientales de la minería.....	41
Tabla 2. Normatividad minera y ambiental en Colombia.....	45
Tabla 3. Clasificación de DAM según acidez	53
Tabla 4. Principales características del impacto ambiental generado por aguas acidas de mina.....	66
Tabla 5. Tratamientos activos.....	79
Tabla 6. Bacterias asociadas al tratamiento de residuos de minería.....	82
Tabla 7. Aspectos e impactos ambientales del DAM.....	104

Resumen

El drenaje ácido de mina es una problemática ambiental que genera una gran preocupación con respecto al impacto adverso de los contaminantes presentes en este tipo de drenaje, en la vida acuática del medio receptor y en la afectación a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas y en como las comunidades expuestas se puedan ver perjudicadas. El drenaje ácido de mina (DAM) se produce a partir de la oxidación de sulfuros metálicos, especialmente los de hierro, (generalmente pirita), en presencia de oxígeno, agua y actividad bacteriana.

Este trabajo está enfocado en analizar los impactos ambientales que son provocados por la producción de DAM en cualquier tipo de explotación de yacimientos mineros y descubrir esos procesos y esas fuentes que contribuyen a la generación de DAM. Los resultados obtenidos a través de la documentación indican que las variables más relevantes en cuanto a la caracterización de las aguas de mina son el pH, los sulfatos y los metales disueltos o totales.

Palabras claves: drenaje ácido de mina, metales pesados, sulfuros, pH.

Abstract

Acid mine drainage is an environmental problem that generates great concern regarding the adverse impact of pollutants present in this type of drainage, in the aquatic life of the receiving environment and in affecting the quality of surface and groundwater and how exposed communities can be harmed. Acid mine drainage (DAM) is produced from the oxidation of metal sulphides, especially iron, (usually pyrite), in the presence of oxygen, water and bacterial activity.

This work is focused on analyzing the environmental impacts that are caused by the production of DAM in any type of mining deposits exploitation and discover those processes and those sources that contribute to the generation of DAM. The results obtained through the documentation indicate that the most relevant variables regarding the characterization of mine waters are pH, sulfates and dissolved or total metals.

Key words: acid mine drainage, heavy metals, sulfides, pH.

Capítulo 1. Generalidades

Introducción

La industria de explotación minera es una de las actividades más problemáticas en todo el mundo, dado a que, si bien generan un gran aporte económico, los problemas socioambientales también se hacen notar en las zonas de extractivismo. La minería y su proceso son fuente de muchos contaminantes que están dispuestos en el ambiente, uno de ellos es el drenaje ácido de mina (DAM) el cual a nivel mundial es una de las primeras causas de la degradación de los recursos hídricos que conforman las masas de agua continentales y marinas (Rodríguez, 2011).

Las aguas de drenaje de la minería son efluentes líquidos muy contaminantes, por sus altas concentraciones de sólidos, sulfatos y metales disueltos; además, se asocian a elevados valores de acidez que dan a las aguas un alto poder corrosivo (Salazar, Hernández y Arango, s.f.). La acidificación del agua al estar en contacto con los desechos mineros la convierte en una sustancia capaz de poner y mantener en solución dichos elementos y transportarlos mientras se mantengan las condiciones de acidez, por esta razón los arroyos y aguas subterráneas ácidos generados en las minas constituyen un riesgo ambiental ya que pueden transportar metales aguas abajo afectando diversos ecosistemas y limitando el uso del agua (Kirschbaum y Murray, 2011).

Durante la explotación de determinados yacimientos (carbón, sulfuros metálicos, hierro, uranio y otros) quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurosos que pueden llegar a formar drenajes ácidos, para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de

agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias (Aduvire, 2006). De acuerdo con (Peña y Pérez, 2009) el desarrollo del DAM es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos fisicoquímicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento, el cual consiste en atrapamiento de los óxidos y de los sulfuros que al contacto con el agua no se rompe su molécula y por lo tanto ellos continúan en el drenaje provocando en su recorrido la formación de nuevos DAM al romperse la molécula.

A pesar del crecimiento del sector minero y de su importante participación dentro de la actividad económica colombiana durante los últimos años, aún existen zonas donde se han cerrado o abandonado minas sin el control efectivo, estos sitios abandonados permanecen como focos de contaminación, provocando graves daños ambientales. Por eso es necesario ejecutar una fiscalización por parte de las autoridades de aplicación durante la explotación y a medida que se incrementa el conocimiento de los materiales que se extraen de la mina. De esta manera, no sólo se asegura una mejor disposición final de los residuos y la implementación de técnicas para prevenir el DAM, sino que se reducen los costos de cierre de mina cuando finalice la operación.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente forma, inicialmente se contextualiza brevemente el sector minero para identificar las formas de minería, las etapas de esta industria y sus impactos socioambientales dentro del territorio colombiano; se analiza las características del DAM, cuáles son sus mecanismos de formaciones, las etapas de producción que contribuyen a su generación y como afecta el drenaje ácido de mina al medio ambiente y a los ecosistemas; para finalizar se presentan algunos casos de

tratamientos implementados y/o en estudio para enfrentar casos reportados de minas que han generado DAM en Colombia.

Planteamiento del problema

La minería es una de las actividades más antiguas, la cual consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales a través de trabajos subterráneos, subacuáticos o a cielo abierto (Ministerio de Minas y Energía, 2003). El sector minero viene destacado por su relevancia en cuanto al crecimiento económico de diferentes países, sin embargo, su aprovechamiento se debe hacer respetando el entorno ambiental e identificando los posibles conflictos que genere en el territorio (Viana, 2018). En este contexto uno de los principales problemas de la industria minera, se enfoca básicamente en la generación de drenaje ácido debido a las tareas propias de exploración y de desarrollo de una mina (Espinosa, Hidalgo y Delgado, 2016).

El DAM es un flujo de agua proveniente de minas que es generado por la oxidación acelerada de la piritita (FeS_2) u otro mineral azufrado. Este proceso ocurre por la exposición de estos minerales a la intemperie, lo que ocasiona que el oxígeno y/o el agua oxiden al azufre a una tasa mayor de lo que se reduce, promoviendo la movilización del azufre y de los metales que formaban parte del mineral (Moreno, 2014). Según (Barón, 2013) las características principales de los DAM son valores bajos de pH (entre 2 y 5), altos contenidos de sulfatos (varios miles de mg/L), hierro (entre 50 y 1000 mg/L), zinc (hasta 200 mg/L), manganeso (entre 1 y 100 mg/L), aluminio, plomo, cobre níquel, mercurio, cadmio, cromo y otros elementos tóxicos como el arsénico y concentraciones elevadas de calcio y magnesio.

Algunos antecedentes registrados estiman que sólo en Estados Unidos hay más de

20.000 km de ríos que están afectados por este problema. En el caso del Perú están afectadas por DAM las cuencas fluviales de los ríos Rimac, Mantaro, Pisco, Madre de Dios, Llaucano y Santa (Rodríguez, 2011). En Colombia se han presentado y detectado DAM, principalmente en las explotaciones de carbón y oro, en los yacimientos que actualmente son explotados en el departamento de la Guajira (Peña y Pérez, 2009). Sin embargo, en Colombia aún sigue existiendo la falencia en cuanto a información específica sobre las fuentes hídricas que están afectadas por DAM para poder llegar a una remediación de las mismas. De igual forma otro factor que se desconoce, son los autores de muchos de los casos de DAM, debido a los altos porcentajes de explotaciones mineras ilegales en Colombia, lo que genera una incógnita sobre quien debe asumir esta obligación ambiental.

Las explotaciones de yacimientos mineros pueden llegar a presentar drenaje ácido de mina, tanto durante su período de actividad como una vez que la explotación ha cesado, dado que ésta puede seguir produciendo volúmenes importantes de aguas ácidas. El desarrollo del drenaje ácido es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados; en algunos asientos mineros, el drenaje ácido se detecta desde el principio de las operaciones, en otros, pueden llegar a pasar varias décadas antes de que se observe drenaje ácido minero. En los sitios donde se tarda para que se presenten las reacciones de oxidación de sulfuros y generación de ácido es porque probablemente estuvieron ocurriendo durante el intervalo de retardación previo a la medición del agua de drenaje, pero en una baja proporción y con neutralización de los productos de oxidación (Chaparro, 2015).

Debido a que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de

años una vez finalizado el ciclo productivo, existe la necesidad de identificar los procesos y las fuentes generadora de DAM, para prevenir su formación y evitar los efectos negativos que se pueden provocar al medio ambiente causando graves perjuicios como mortandad de peces y crustáceos de ríos, afecciones al ganado, y destrucción de cultivos y riberas, y un incremento de la turbiedad de las aguas imposibilitando estas aguas para el consumo humano. Por ello, a través de la documentación consultada y el análisis de la información obtenida sobre el tema, se pretende dar respuesta a la pregunta de investigación: **¿Qué estudios han permitido evidenciar la problemática ambiental generada por drenaje ácido de mina en Colombia?**

Justificación

El drenaje ácido de mina (DAM) se refiere al agua contaminada, esto quiere decir agua que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios que podría ocasionar un impacto ambiental adverso (Zevallos, 2016). Entre los problemas de contaminación producidos por el DAM destaca la contaminación de cuerpos de agua con altas concentraciones de hierro (con la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$, que provoca coloración roja/naranja), alto contenido de sulfato (superior a los 2 500 mg/l (Pérez, Schwarz, y Urrutia, 2017) y también algunos metales pesados. Una mina generadora de drenaje ácido tiene el potencial de tener impactos devastadores a corto e inclusive, en el largo plazo sobre los ríos, arroyos y la vida acuática presente en éstos; hechos que terminan por perjudicar a las comunidades locales expuestas, dado que les impide utilizar estos recursos hídricos para su consumo personal o riego. El drenaje ácido minero es considerado por la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) como una de las tres principales amenazas al ecosistema, razón por la cual, en los últimos años ha aumentado el desarrollo y optimización de los programas de predicción de drenaje, con el objetivo superior de adoptar las medidas necesarias para su prevención (Bahamóndez, 2012). Por lo tanto, es importante que en Colombia se insista en la adopción de prácticas y técnicas preventivas, que conduzcan a minimizar la formación de DAM durante la fase de extracción, ya que, una vez formado el drenaje, son complicados y costosos, su control, su seguimiento y su monitoreo (Contreras, 2016).

Los aportes que brinda esta exploración bibliográfica es la identificación concreta de los procesos y fuentes que generan DAM, al igual que una caracterización de los

impactos ambientales que puede conllevar, considerando que puede ser de gran utilidad este tipo de información para analizar la problemática relacionada con el drenaje ácido de mina en Colombia. Esta investigación va desarrollada para los actores involucrados, sean las comunidades expuestas, industria minera, autoridades ambientales y comunidad académica que sientan interés por el tema, los cuales pueden ser del campo minero, como ambiental.

Marco conceptual

1.1.1. Que es la minería

La minería es una actividad económica que está compuesta por ciencias, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. En la práctica, el término incluye las operaciones a cielo abierto, canteras, dragado aluvial y operaciones combinadas que incluyen el tratamiento y la transformación bajo tierra o en superficie. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre (Ministerio de Minas y Energía, 2003). La industria minera tiene diferentes modelos extractivos, por eso es fundamental conocer el tipo de minería, sus características, extensión, el material que se extrae, entre otros aspectos; de ahí puede variar sus impactos ambientales y sociales del proyecto. La minería se clasifica básicamente en tres tipos: en labores subterráneas, superficiales también llamadas a cielo o tajo abiertos, y la minería que se desarrolla en cuerpos de agua y/o materiales poco compactos, que es nombrada minería aluvial.

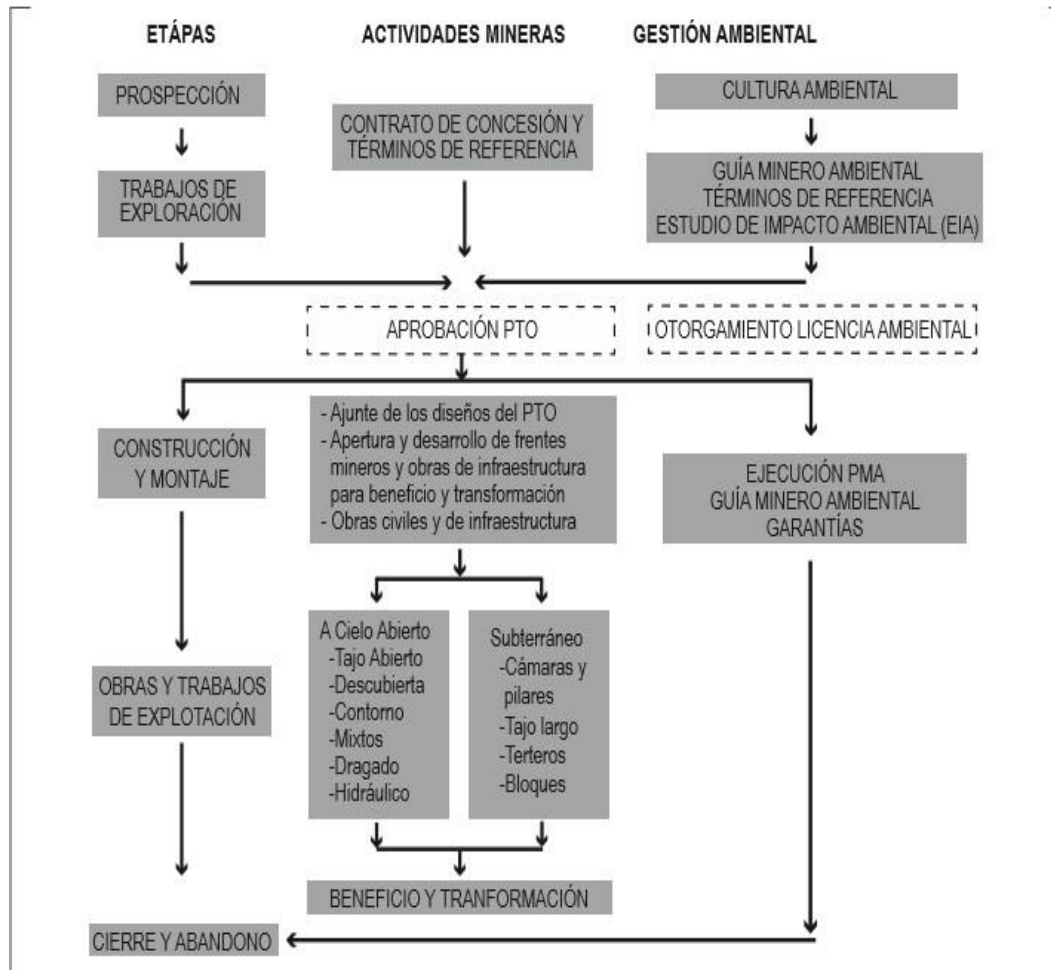
Figura 1. *Tipos de explotaciones mineras.*



Fuente: basado en (Banco Central del Ecuador, 2014).

El ciclo minero en general tiene su base en cinco principales etapas, las cuales son: La prospección, los trabajos de exploración, la construcción y el montaje, las obras y trabajos de explotación y el cierre y abandono. En la ilustración 2, se establece las etapas, las actividades geológicas-mineras y de gestión ambiental, que se llevan a cabo durante la ejecución de la actividad minera. Cada una de estas, lleva un ciclo en fases, desde el inicio de la obra hasta el cierre de la misma, como lo determina el Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

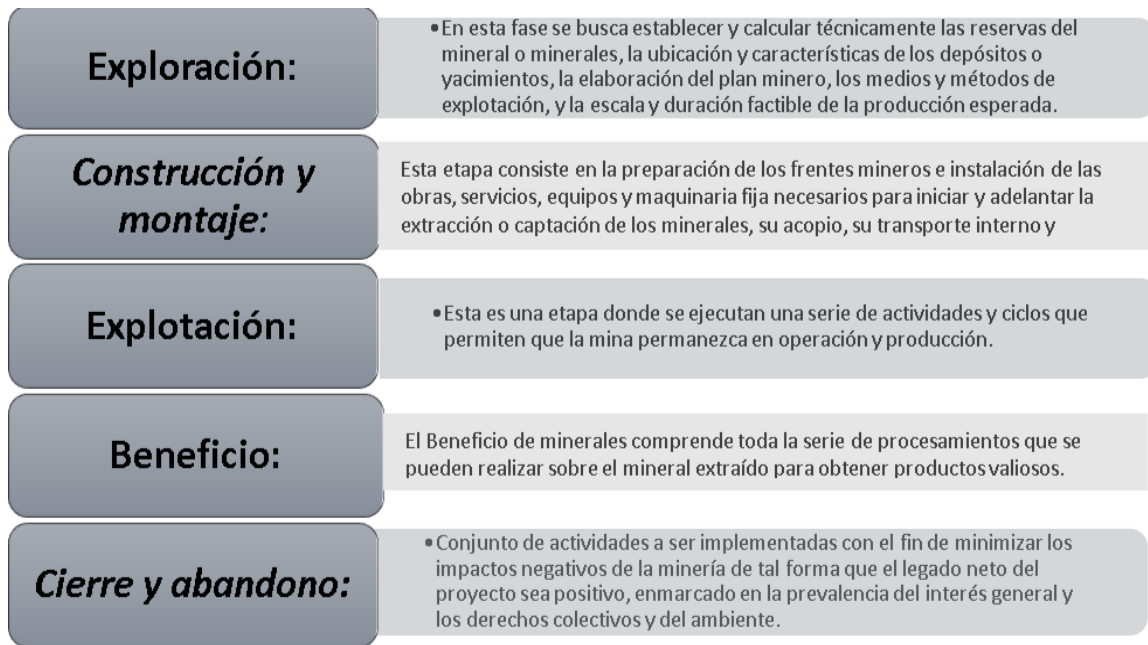
Figura 2. *Esquema del ciclo de desarrollo minero.*



Fuente: López, López & Medina (2017).

A continuación, se definen estas etapas principales de la minería, todo ello con el propósito de alcanzar una mayor y mejor comprensión del tema.

Figura 3. Etapas de la minería.



Fuente: basado en ministerio de minas y energía, 2003.

1.1.2. Actividad minera en Colombia

La industria de la minería indudablemente ha presentado un papel fundamental en la economía del país desde la época precolombina; según registros históricos, las diferentes culturas indígenas realizaban trabajos de cerámica y orfebrería, muy valorados. Al principio, la actividad minera dio origen al comercio regional caracterizado por el intercambio de varios minerales. Ya después, en la época de la Colonia, la minería creció a grandes rasgos y con ello se abrió paso al comercio de esclavos africanos. Los más beneficiados con el régimen colonial, fueron los comerciantes antioqueños, quienes eran los que transportaban el oro en polvo a otras regiones de la Nueva Granada y al exterior, con la idea de practicar el trueque por otras mercancías como textiles y alimentos (Monsalve, 2017). Hasta entrado el siglo XX, Colombia fue el principal exportador de oro de América

Latina. En la actualidad, el país exporta principalmente tres minerales: carbón, ferroníquel y oro. El primero se extrae en el extremo nororiental del país en la frontera con Venezuela, en volúmenes cercanos a los 90 millones de toneladas anuales, en minas operadas por un consorcio de tres grandes corporaciones mineras. La mina de ferroníquel se encuentra en el noroccidente del país, operada por la multinacional BHP Billiton, con una producción de alrededor de 150 mil toneladas anuales. La producción de oro en Colombia fue de 55,7 toneladas en 2013, equivalente al 1,8% de la producción minera mundial (3011 ton/año) (Poveda et al., 2015).

Colombia es un país con múltiples ventajas geográficas, una amplia variedad de recursos minerales y a la vez, serias debilidades estructurales para su efectiva administración consolidadas a través de la historia (Cubillos, Gil y Martínez, 2016). Según algunos reportes, el vertiginoso aumento del precio de las materias primas, entre ellas el oro, puso a América Latina ante la apuesta por el crecimiento económico basado en el extractivismo. En Colombia se implementaron una serie de medidas jurídicas y políticas que posibilitaron la acumulación de títulos mineros, en particular de minería de oro. Esta acumulación se ha llevado a cabo por parte de un conglomerado de empresas mineras que aparentemente operan coordinadamente, lo que permite pensar en la acepción económica de la palabra cartel, sobre la cual se plantea la existencia de un cartel de la gran minería de oro en Colombia (Poveda et al., 2015).

En los últimos gobiernos del país han impulsado un modelo extractivista de los recursos naturales no renovables que se ha concretado en gran medida en el incremento de las actividades mineras en buena parte del territorio nacional. No puede obviarse que la

Constitución Nacional establece la obligación del Estado de proteger el ambiente, que reviste un interés público normativamente superior al criterio legal de utilidad pública de la explotación. El auge que ha tenido la minería en Colombia no es solo producto de estas políticas y dinámicas internas, también se han identificado factores externos, así por ejemplo, el aumento de la demanda de materias primas en el mundo desarrollado ha elevado los precios durante las últimas dos décadas de manera que empresas multinacionales del sector minero han emigrado a los países que tienen las materias primas, dirigen la economía a la explotación y exportación de las mismas, implicando que los países encaminen sus políticas a la permanencia de estas empresas (Cubillos et al., 2016). La demanda creciente de minerales a nivel mundial ha generado un incremento en las explotaciones mineras en países con reservas potenciales de diverso tipo como Colombia. En muchas ocasiones estas explotaciones son antitécnicas e irracionales, indiscriminadas y sin planeamiento minero alguno, generando pérdidas significativas de las reservas explotables y deterioro de yacimientos. Las actividades mineras de pequeña escala, realizadas con tecnologías artesanales tienen un papel preponderante en las estrategias de adaptación territorial de comunidades marginadas a sus ecosistemas, y significan ingresos de subsistencia en las economías locales. Este tipo de minería tiene notables problemáticas, pero no tiene la capacidad de afectar estructuralmente al país como lo tiene la gran minería extractiva (Poveda et al., 2015).

Actualmente la contribución de la minería a la economía colombiana ha registrado incrementos progresivos, evidenciados en indicadores como el PIB minero, las exportaciones de minerales y la inversión extranjera directa en minería, entre otros; esa dinámica ha obedecido principalmente al interés inversionista en las actividades del ciclo

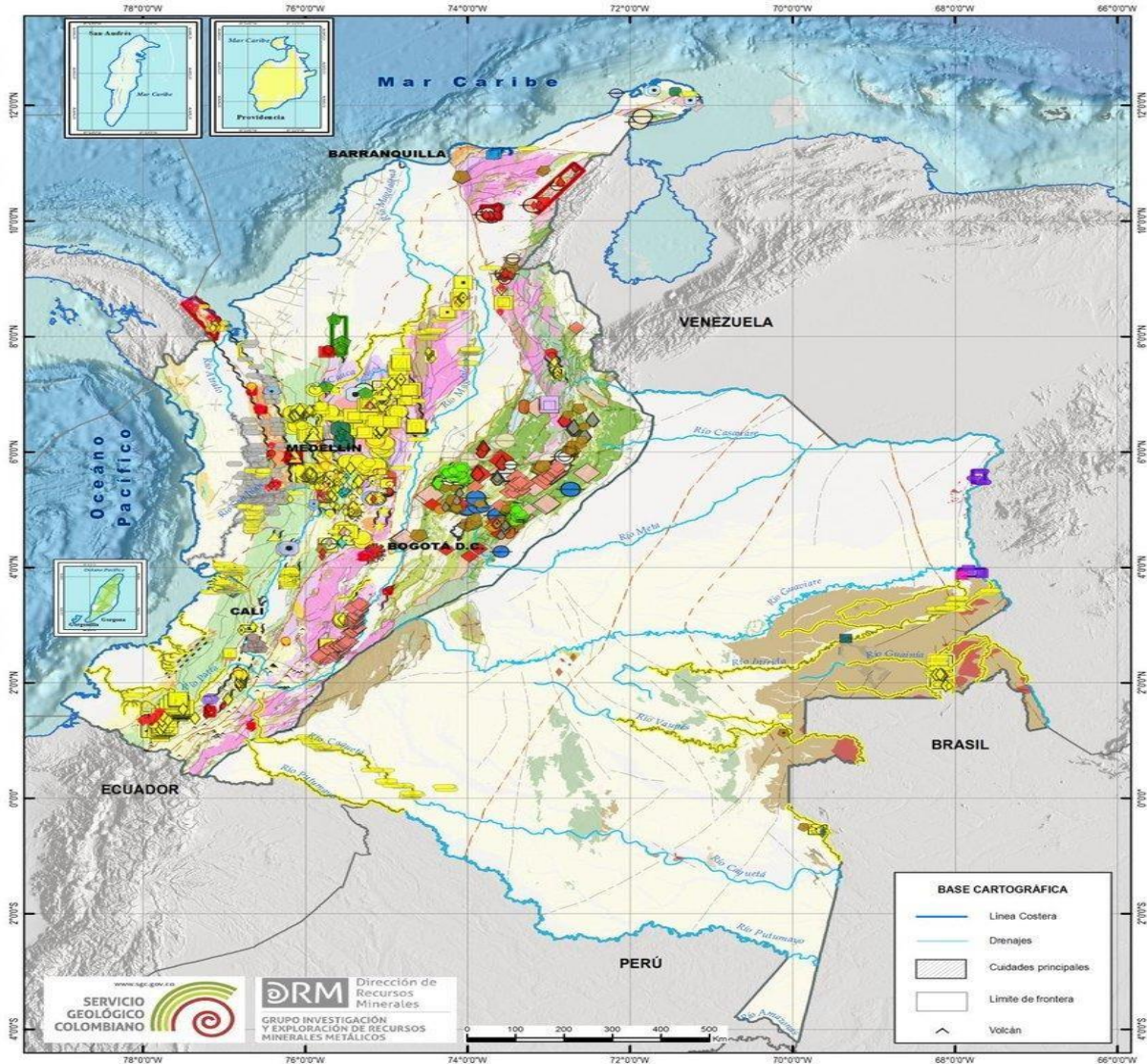
minero (exploración y explotación). Con base en los datos del Catastro Minero Colombiano efectuado por el Ministerio de Minas y Energía -MME (a julio de 2012), se tiene que los títulos mineros para explotación de oro constituyen el 43% del total, en tanto que los de carbón participan con otro 25%. Cuando se analiza el porcentaje de área titulada para explotación de oro se encuentran datos preocupantes como la situación del departamento de Caldas donde el 8% de su territorio se encuentra titulado y el 47% solicitado, y de Antioquia donde se ha titulado el 10% del área del departamento y se encuentra en solicitud otro 30%. Y en departamentos amazónicos como el Vaupés y Guainía, donde se encuentra en solicitud para explotación de oro el 31% y el 15% de sus áreas, respectivamente. De los 31 departamentos continentales de Colombia, apenas 10 de ellos tienen menos del 10% de su territorio titulado o solicitado para explotación de oro y carbón (Garay et al., 2013). Tal y como lo señala Cubillos (2016), un título minero es la autorización que da el Estado a una persona natural o jurídica para obtener beneficios de un posible recurso minero disponible en el territorio nacional. A la fecha, la mineralización, o explotación de minerales, es posible de manera libre en todo el territorio colombiano, con excepción de las áreas naturales protegidas y aquellos terrenos declarados como zonas mineras de comunidades étnicas.

Las zonas excluidas actualmente de las actividades mineras son: Ecosistemas de páramos, humedales designados de importancia internacional en la lista RAMSAR, arrecifes de coral, manglares, áreas de sistema de parques nacionales naturales, parques naturales regionales, áreas de reservas forestales protectoras, en este caso, tanto las nacionales como las regionales. Ahora bien, otras zonas como las áreas de reserva forestal establecidas por la Ley 2 de 1959, pueden ser sustraídas, permitiéndose así el desarrollo de

actividades mineras, lo cual no es coherente con el deber de protección de los recursos naturales renovables, por cuanto si estas áreas se destinaron por el legislador a la conservación y uso sostenible de los bosques (conservación estricta y aprovechamientos persistentes, según sea el área sea zonificada como protectora o productora), en principio no deberían sustraerse para permitir otro tipo de actividades (Garay et al., 2013).

Desde el año 2003, se entregaron masivamente títulos para exploración y explotación minera de oro equivalentes a 2,6 millones de hectáreas. Se entregaron casi seis millones de hectáreas al sector minero en su conjunto. Mientras que se solicitan para titulación otros 23 millones de hectáreas más. El área de títulos y solicitudes mineras equivale a la tercera parte del territorio colombiano (Poveda et al., 2015). Según la visión “Colombia País Minero 2019”, los objetivos de política son duplicar la exportación de carbón y cuadruplicar la de oro. En términos de economía ecológica estos dos materiales tienen algo en común: son exportados crudos de Colombia casi en su totalidad (99% del oro y entre 92 y 95% del carbón), razón por la cual no establecen encadenamientos productivos y, por lo tanto, no dinamizan directamente la economía, al menos de manera apreciable respecto al valor explotado. Además, en el caso del carbón, la mayor parte del volumen exportado se relaciona con la gran minería a cielo abierto, la que es también la prospectiva de la minería de oro de gran escala, con sus consabidos impactos negativos en el medioambiente (Garay et al., 2013).

Figura 4. Mapa de depósitos de minerales de Colombia.



Fuente: Dirección de recursos minerales DRM & servicio geológico colombiano SGC.

(2016). Mapa de depósitos de minerales de Colombia [mapa]. Recuperado de

<https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Paginas/Mapa-metalogenico-de-Colombia.aspx>

La actividad minera del país está regulada por el código de minas Ley 685 de 2001, la cual contempla como objetivo fomentar la exploración técnica de los recursos mineros de propiedad estatal y privada con los principios y normas de los recursos naturales no

renovables y de ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país. En Colombia hay tres tipos de minería: la tradicional, artesanal o pequeña minería, realizada por minorías étnicas desde tiempos ancestrales y por campesinos desplazados; la mediana, que trabaja con dragas y retroexcavadoras; y la gran minería efectuada generalmente por multinacionales (PBI Colombia, 2011).

1.1.3. Impacto ambiental y social por parte de la minería.

El sector minero ha sido considerado como uno de los grandes factores que da más aporte económico al país. Si bien el motor económico que representa la minería no ha sido el único factor que ha sido analizado, de alguna forma si le ha restado relevancia al bienestar social y ambiental de las comunidades donde se desarrollan actividades mineras dentro del país, donde muchos de ellos reclaman y exigen actividades productivas relacionadas y centradas al marco de sostenibilidad. En los distritos donde se llevan a cabo los principales proyectos de minería se suelen presentar conflictos sociales y ambientales donde se evidencia la necesidad y el compromiso institucional y gubernamental para que prevalezca los beneficios comunes.

La minería en Colombia se caracteriza por una serie de impactos que tienen que ver con el carácter intensivo, prolongado y sistémico de las actividades extractivas y de las externalidades que generan en los territorios la exploración y explotación de minas de

propiedad estatal a través de complejos industriales privados (Garay et al., 2013). Con el objetivo de estimular el desarrollo del sector minero el Gobierno durante los últimos años, ha promovido cambios normativos que han abierto camino para la intensificación de la explotación minera ya que declaró la minería como una actividad de utilidad pública y de interés social; También declaró la lucha contra la minería ilegal. Estas políticas mineras han incrementado fuertemente la explotación a gran escala. Los pequeños mineros, en cambio, se encuentran marginalizados y en algunos casos perseguidos por su labor tradicional. En Colombia existen al menos seis mil minas de la considerada pequeña minería, de las cuales viven millones de colombianos, es una actividad que no les genera grandes ingresos y es un medio de subsistencia cada vez más amenazado por las multinacionales quienes son los que desarrollan la gran minería (PBI Colombia, 2011).

Por otra parte, los actores armados ilegales también han encontrado en la minería una vía para incrementar sus ingresos. Si se analiza el mapa de Colombia, se puede observar fácilmente que la ubicación de estos grupos coincide con las áreas de explotación minera. Esta problemática resulta aún más compleja puesto que las autoridades presentan cierta incapacidad de diferenciar lo ilegal de lo legal y que pareciera verter en un solo molde, las actividades a baja escala que se pudieran permitir a pequeños y tradicionales mineros con las actividades de alto impacto que se desarrollan sin la obtención previa de un título minero y que se encuentran realmente lideradas por bandos criminales (Garay et al., 2013).

El cambio que sufren las regiones mineras, las cuales son mayormente de forma negativa y distante al desarrollo real que merecen sus pobladores, quienes muchas veces

creen que la explotación de minerales les puede ofrecer un crecimiento económico para sus hogares, esto se convierte en una falacia cuando la realidad que se evidencia en cada lugar es otra, puesto que la pauperización de las comunidades es cada vez mayor tanto en términos ambientales como sociales. En la actualidad en Colombia ya existe varias minas que están haciendo que sus procesos sean más sostenibles, con la implementación de nuevas tecnologías o la implantación de la producción más limpia en sus prácticas operativas. Como bien se sabe la explotación ha sido por muchos años fuente de materia prima, pero la extracción de oro por ejemplo es una de las actividades del sector minero que más daño causa al medio ambiente, hay una diversidad de minas donde ya se han implementado entro de sus procesos la recuperación del oro sin la utilización de cianuro, reutilización del mercurio, la instalación de micromedidores para poder llevar registro contable del agua utilizada entre otras alternativas (Monsalve, 2017). Uno de los temas de mayor impacto ambiental, es el daño al agua, el cual ocurre de dos maneras principales: la primera se relaciona con el hecho de que las rocas que se constituyen en los desechos mineros poseen altas cantidades de sulfuros que generan acidez cuando son expuestos al aire, (este tema se ampliara en los próximos capítulos) y la segunda con la adición de elementos químicos altamente contaminantes como el cianuro que generan residuos muy alcalinos. Tanto las condiciones de acidez como de alcalinidad extrema permiten la disolución de especies químicas tóxicas que se esparcen con las corrientes de agua contaminadas, situación que también ha llevado a la contaminación de aguas subterráneas y de suelos (Garay et al., 2013). Las consecuencias generadas por el mal uso y demás situaciones que interfieren en nuestro medio ambiente por la explotación minera, en los últimos años ha desmejorado notoriamente la calidad ambiental, lo cual ha llevado a una problemática socioambiental de gran magnitud.

algunos de los impactos más notorios en zonas mineras son: nuevos conflictos por la tenencia de la tierra, disputa de actores armados ilegales por capturar una porción de la renta minera, incremento de la población migrante, demanda creciente por el agua, contaminación de fuentes de agua y suelos, daños al paisaje, alteración en el sistema biofísico, entre otros. Respecto a la minería se encuentran, entre otras afectaciones ambientales, las siguientes:

Tabla 1: *impactos ambientales de la minería.*

Sistema	Componente	Impactos	Actividades que generan el impacto
Medio físico	Suelo	Hundimiento del terreno. Erosión sobre botaderos de estériles.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acomodamiento, construcción, y operación de campamentos, helipuertos, etc. ➤ Utilización y adecuación de accesos ➤ Apertura de trincheras y apiques
	Agua	Contaminación química de las aguas. Sedimentos. Incremento de turbidez. Disminución de caudales. Alteración del curso de los cauces.	
	Aire	Alteración por emisión de gases.	

Sistema	Componente	Impactos	Actividades que generan el impacto
		Emisión de partículas. Ruido.	➤ Pozos y galerías exploratorias
	Paisaje	Alteración del relieve. Disminución de calidad visual.	➤ Perforaciones y voladuras. ➤ Utilización de maquinaria. ➤ Proceso de beneficio.
Medio biótico	Flora	Remoción de vegetación. desforestación.	➤ Fase de explotación ➤ Construcción y montaje
	fauna	Alteración de habitat. Migración de especies. Disminución de especies.	➤ Perforación y voladuras ➤ Remoción de estériles ➤ Extracción de minerales ➤ Disposición de escombros. ➤ Desagüe de mina.

Sistema	Componente	Impactos	Actividades que generan el impacto
			➤ Cierre y abandono
Medio social	Demográfico	Mayor nivel de empleo Incremento en el número de habitantes (flujos migratorios y desplazamiento).	➤ Fase de explotación ➤ Cierre y abandono
	Económico	Incremento en el nivel de ingresos per-capital Mayor nivel de consumo Valoración de los predios regalías	
	Cultural	Cambio de costumbres	

Fuente: basado en López, López & Medina (2017).

Los problemas de contaminación planteados en la tabla anterior se constituyen en parte de una red intrincada de relaciones, ya que aire y agua contaminadas pueden implicar problemas de salud pública y, además, un riesgo sobre la soberanía alimentaria, en particular de comunidades campesinas y étnicas marginadas y con ingresos económicos precarios que dependen de sus propios cultivos. A su vez, el daño a los ecosistemas puede representar un pasivo gigantesco en términos de provisión de aguas potables para grandes

comunidades urbanas y la pérdida de conocimientos ancestrales que puede llevar a una disminución en la capacidad de adaptación ante el cambio climático (Garay et al., 2013).

En cuanto a las afectaciones y perturbaciones sociales se han identificado violaciones a derechos humanos que se encuentran asociadas a la presencia minera en los territorios en conflicto. Según (Garay et al., 2013) el 80% de las violaciones a los derechos humanos que ocurren en Colombia, se presentan en los municipios mineros-petroleros (el 35% del total nacional); el 87% del desplazamiento forzado sale de estos municipios y quienes reciben regalías por producción minero-energética; el 78% de los crímenes contra sindicalistas, 89% contra indígenas y 90% contra afrodescendientes, se cometen en áreas minero-energéticas. En Colombia los datos sobre salud pública en relación con la contaminación generada por minería son precaria. Por ejemplo, en la zona de influencia del proyecto Cerrejón en el departamento de la Guajira, se presentan altos índices de infecciones respiratorias agudas y en el municipio de Segovia Antioquia se registran altos niveles de mercurio en el ambiente impactando gravemente a sus pobladores.

La actividad minera sin control, además de afectar los derechos al goce de un ambiente sano y aprovechamiento racional de los recursos naturales, vulnera los derechos a la vida, la salud, la seguridad y salubridad pública, la seguridad y prevención de desastres previsibles técnicamente, la seguridad alimentaria y el derecho humano al agua; estas razones hacen que las poblaciones de las regiones mineras del país, necesiten y exigen la formulación de una política minera por parte del gobierno cuyo objetivo fundamental sea que la actividad minera, en todas sus escalas y tipos de explotación, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva, sostenible y responsable.

Marco legal

La legislación colombiana incluye dos marcos jurídicos el minero y el ambiental, en la tabla 2 se presenta un resumen del marco legal minero y ambiental.

Tabla 2. *Normatividad minera y ambiental en Colombia.*

Normatividad minera y ambiental en Colombia		
Normas generales, licencias ambientales y permisos	Ley 685 de 2001	Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 2811 de 1974	Reglamenta el uso de los recursos Naturales Renovables (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Decreto 1076 – Capítulo 3, Licencias ambientales	Se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales - Explotación minera: En lo que respecta a la definición de explotación minera se acogerá lo dispuesto en la Ley 685 de 2001, o la que la modifique, sustituya o derogue.

		(ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Decreto 1076 de 2015, capítulo 11 Departamento de gestión ambiental de las empresas a nivel industrial.	Reglamenta el departamento de gestión ambiental de las empresas a nivel industrial. (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Ley 1658 15 de Julio de 2013	En la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones.
Usos del agua	Decreto 1076 de 2015 CAPÍTULO 4. Registro de usuarios del recurso hídrico.	Establece todo lo relativo a permiso para aprovechamiento o concesión de aguas, normas específicas para los diferentes usos dados al recurso hídrico

		(ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Decreto 1076 de 2015 CAPÍTULO 6 Tasas por utilización del agua.	Por el cual se reglamentó el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Ley 373 de 1997	Fija obligaciones sobre ahorro y uso eficiente de agua a quienes administran y/o usan el recurso hídrico (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 1997).
	Decreto 1374 2013	Por el cual se establecen parámetros para el señalamiento de unas reservas de recursos naturales de manera temporal y se dictan otras

		disposiciones (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2013).
Vertimientos	Decreto 1076 de 2015: CAPITULO 3 ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos.	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
	Decreto 1076 de 2015: CAPÍTULO 7 tasas retributivas por vertimientos puntuales al agua.	Por el cual se reglamentó la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).

	Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).
--	------------------------	--

Objetivos

1.1.4. Objetivo general

Realizar un análisis sobre la problemática ambiental generada por el Drenaje Acido de Mina (DAM) en la explotación de yacimientos mineros en Colombia.

1.1.5. Objetivos específicos

- Recopilar información asociada a los drenajes ácidos de mina en Colombia.
- Identificar los procesos y las fuentes generadoras de drenaje acido en la explotación de yacimientos mineros.
- Analizar los posibles impactos ambientales de esta práctica teniendo en cuenta los hallazgos encontrados.
- Revisar los mecanismos o métodos de control aplicados al manejo de los drenajes ácidos de mina.

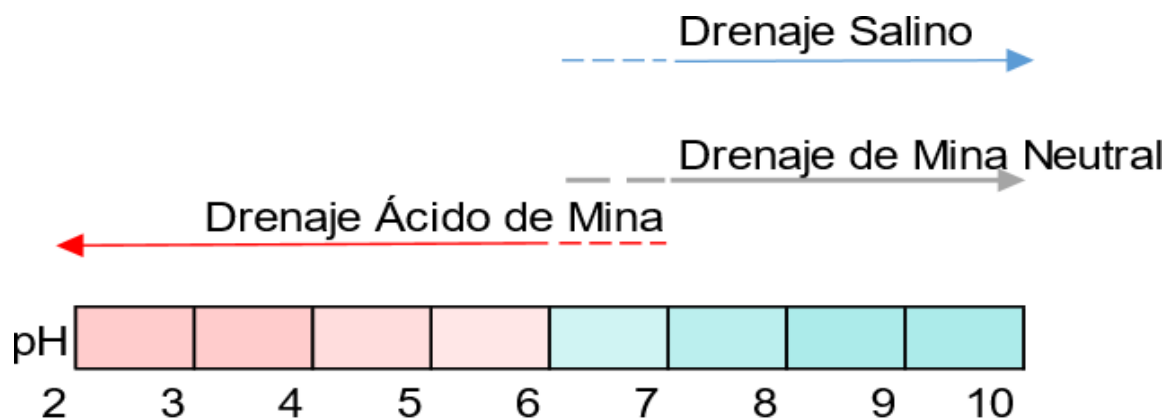
Capítulo 2. Descripción y Análisis

Drenaje Ácido de Mina (DAM)

2.1.1. Definición de drenaje ácido de mina

En materia de protección al medio ambiente y del equilibrio ecológico, uno de los principales problemas de la industria minera, se enfoca básicamente en la generación de drenaje ácido debido a las tareas propias de exploración y de desarrollo de una mina. Dependiendo del tipo de estructura mineralizada, los productos de la actividad minera en conjunto con las soluciones que fluyen en una mina húmeda constituyen zonas potencialmente peligrosas para la generación de agua ácida.

Figura 5. Drenaje minero según pH.



Fuente: INAP, 2014.

El pH es un parámetro muy utilizado para expresar la acidez del agua ya que tiene en cuenta la concentración de protones. La escala de pH va de 1 a 14, donde se puede concebir que el agua con $\text{pH} = 7$ es neutra, por debajo de 7 es ácida y por arriba es básica.

Independientemente de la fuente que da origen a los drenajes de mina, éstos se pueden subdividir en dos grandes grupos: los drenajes alcalinos (bajo potencial de solubilización) y los drenajes ácidos (alto potencial de solubilización).

Para determinar el tipo de drenaje es necesario hacer un estudio detallado de las condiciones físicas del medio, el clima del lugar y una caracterización de los efluentes de mina. Esta identificación se realiza mediante muestreos de agua y sedimentos y la medición in-situ de parámetros como el pH, contenido de oxígeno, potencial redox, conductividad, temperatura, Fe, acidez/alcalinidad, turbidez, entre otros (Aduvire, 2006).

Tabla 3. Clasificación de DAM según acidez.

Tipo	Descripción	Rango
1	Muy ácido	Acidez neta > 300 mg/l de CaCO ₃ equivalente
2	Moderadamente ácido	Acidez neta entre 100 y 300 mg/l de CaCO ₃ equivalente
3	Débilmente ácido	Acidez neta entre 0 y 100 mg/l de CaCO ₃ equivalente
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad neta < 80 mg/l de CaCO ₃ equivalente
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad neta mayor o igual a 300 mg/l de CaCO ₃ equivalente

Fuente: Sánchez y Ferreira, s.f.

El Drenaje Acido de Mina (DAM), es un flujo de agua proveniente de trabajos mineros, que es generado por la oxidación acelerada de la pirita (FeS₂) u otro mineral azufrado. Este

proceso ocurre por la exposición de estos minerales a la intemperie, lo que ocasiona que el oxígeno y/o el agua oxiden al azufre a una tasa mayor de lo que se reduce, promoviendo la movilización del azufre y de los metales que formaban parte del mineral (Moreno 2014). El desarrollo del DAM es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos fisicoquímicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento (Peña y Pérez, 2009). Esta agua acidificada contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un asiento minero, o que podría ocasionar un impacto ambiental adverso. Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, lo siguiente:

- pH, acidez, alcalinidad
- sulfatos
- nutrientes
- metales (disueltos o totales)
- núclidos radiactivos
- sólidos disueltos totales (SDT); y
- sólidos suspendidos totales (SST).

Las afectaciones de los drenajes mineros se reflejarán en altas concentraciones de metales y metaloides, pH (según la mineralogía) y contenido de sulfatos, esta situación se observará en las corrientes de ríos, arroyos, lagos, que se ven afectados por el drenaje de minas (Bravo et al., 2017). El fenómeno del drenaje ácido de mina ocurre de forma natural, pero se incrementa mayormente cuando las empresas mineras desarrollan tareas de

explotación generando perturbación de las áreas mineralizadas, conduciendo finalmente a exponer los diferentes componentes del yacimiento a los agentes de intemperismo, constituyéndose en zonas potencialmente peligrosas por la generación del drenaje ácido.

La dinámica del drenaje ácido en el medioambiente es compleja y se puede entender como parte de los ciclos biogeoquímicos. En yacimientos y depósitos de residuos mineros como tanques de relaves y botaderos de estériles, en que pueden existir contenidos variables de sulfuros metálicos, ocurren una gama de procesos fisicoquímicos y biológicos (naturales y antropogénicos) que potencialmente pueden influir en la generación, el transporte y los efectos del drenaje ácido en el medio ambiente. Según Salazar et al., s.f este problema ambiental se ha presentado desde hace muchos años con las explotaciones mineras de oro, metales y carbón, donde inicialmente se caracterizó por una alteración muy profunda de la hidrología subterránea, teniendo en cuenta el bombeo del agua como un problema netamente técnico para permitir los desarrollos mineros, sin considerar las implicaciones ambientales que se puedan provocar.

Antes de desarrollarse las actividades mineras en un determinado lugar, es muy reducida la cantidad de pirita expuesta a las condiciones bajo las cuales se producen aguas ácidas. La actividad minera causa fragmentación (permeabilidad secundaria) en las rocas y aumenta la superficie específica de contacto entre las rocas, el aire y el agua. El mineral que mayor capacidad de generar drenaje ácido tiene es el sulfuro de hierro o pirita (Kirschbaum y Murray, 2011). Las operaciones de minería implican la exposición de la pirita a la acción de las aguas superficiales o subterráneas, y permiten, por tanto, su oxidación. Como consecuencia de la explotación de los yacimientos mineros grandes cantidades de

materiales piríticos quedan expuestos a la meteorización. El drenaje ácido puede liberarse desde cualquier parte de la mina donde los sulfuros se expongan al aire y al agua, incluyendo las pilas de material estéril, botaderos de escombros o desecho de roca, relaves, tajos abiertos, túneles y pilas de lixiviación. Una de las principales preocupaciones ambientales relacionadas con la minería de sulfuros es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Heikkinenetal, Ra ñ sa en y Johnson, 2009) algunos de esos efectos hidrológicos son:

- Disminución de la calidad del agua, haciéndola inadecuada para el consumo humano y otros usos.
- Daños ecológicos, alterando o eliminando las comunidades biológicas naturales existentes en los cursos de agua.
- Deterioro del paisaje, por lo que la restauración de las áreas afectadas debe abarcar todos los elementos del medio físico.

2.1.2. Características del Drenaje Acido de Mina

Como ya se ha mencionado, la formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción de algunas bacterias acidófilas como *Thiobacillus ferrooxidans*. Estos microbios son capaces de sobrevivir a pH bajo y catalizar la oxidación de pirita donde se obtiene energía por la oxidación de FeO (Dutta et al., 2017). De todos los factores que intervienen en la formación de aguas ácidas, el agua es el elemento principal, porque actúa como reactivo en la

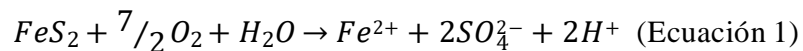
oxidación de la pirita, como medio en el cual se desarrollan las reacciones y como elemento de transporte de los productos formados. Las aguas ácidas de mina se caracterizan por su bajo pH (normalmente entre 2 y 6), por sus altos contenidos en sulfatos (a veces hasta 3500 ppm), y por los elevados contenidos en metales (Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Mo^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+}) en solución (Forigua, Fonseca y Vásquez, 2017).

Una adecuada caracterización debe incluir la medida precisa y representativa del caudal, y al menos los siguientes parámetros químicos: pH in situ, pH en laboratorio, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas todas como CaCO_3); además de contenidos de Fe^{2+} , Fe total, Al, Mn, SO_4^- y conductividad (Cadillo, 2018).

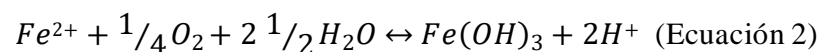
El desarrollo del drenaje ácido de mina es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados. En algunos asientos mineros, el drenaje ácido se detecta desde el principio de las operaciones, aunque en otros casos se puede presentar después de varios años o incluso puede comenzar a producirse luego de un largo período de inactividad de la mina.

Las aguas ácidas generadas en el interior de las minas abandonadas y/o en operación; además de los pasivos ambientales, provocan hoy en día una de las principales fuentes de contaminación al medio ambiente en varias regiones mineras, debido a la presencia de metales pesados disueltos y a su carácter fuertemente ácido (Zamora, s.f.). La alta acidez del DAM es causada a menudo por la oxidación de la pirita, la forma cristalina del sulfuro del hierro (FeS_2). Como resultado de esa oxidación, el ácido sulfúrico se generando condiciones ácidas a los efluentes de la mina (ecuación 1). La pirita es comúnmente

asociada tanto con las situaciones de minas de carbón como las minas de metal, pero el drenaje ácido de minas de metal presenta un problema más severo que la mayoría de los drenajes de mina de carbón porque los agentes prioritarios de contaminación tal como As, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn pueden estar presentes en peligrosas concentraciones (Chaparro, 2015). No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción. Además, no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenido de sulfuro son potencialmente generadores de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez neta es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido (Salazar et al., s.f.).



Cuando, por causas naturales o provocadas, se eleva el pH del agua comienza la precipitación de metales pesados. En este sentido puede decirse que cada metal disuelto precipita a un determinado pH (el manganeso es de los que requiere pH alcalinos más elevados para su precipitación) (Baquero, Fernandez, Verdejo y Lorca, 2008).



Los procesos de generación ácida cambian la composición de los drenajes, reducen o bajan el pH del agua y son capaces de disolver metales pesados contenidos en los mismos. Cuando estos drenajes migran desde los lugares de generación e ingresan al medio

receptor, aportan una alta carga de metales pesados que son dañinos para el medio ambiente (Li Lin, 2013).

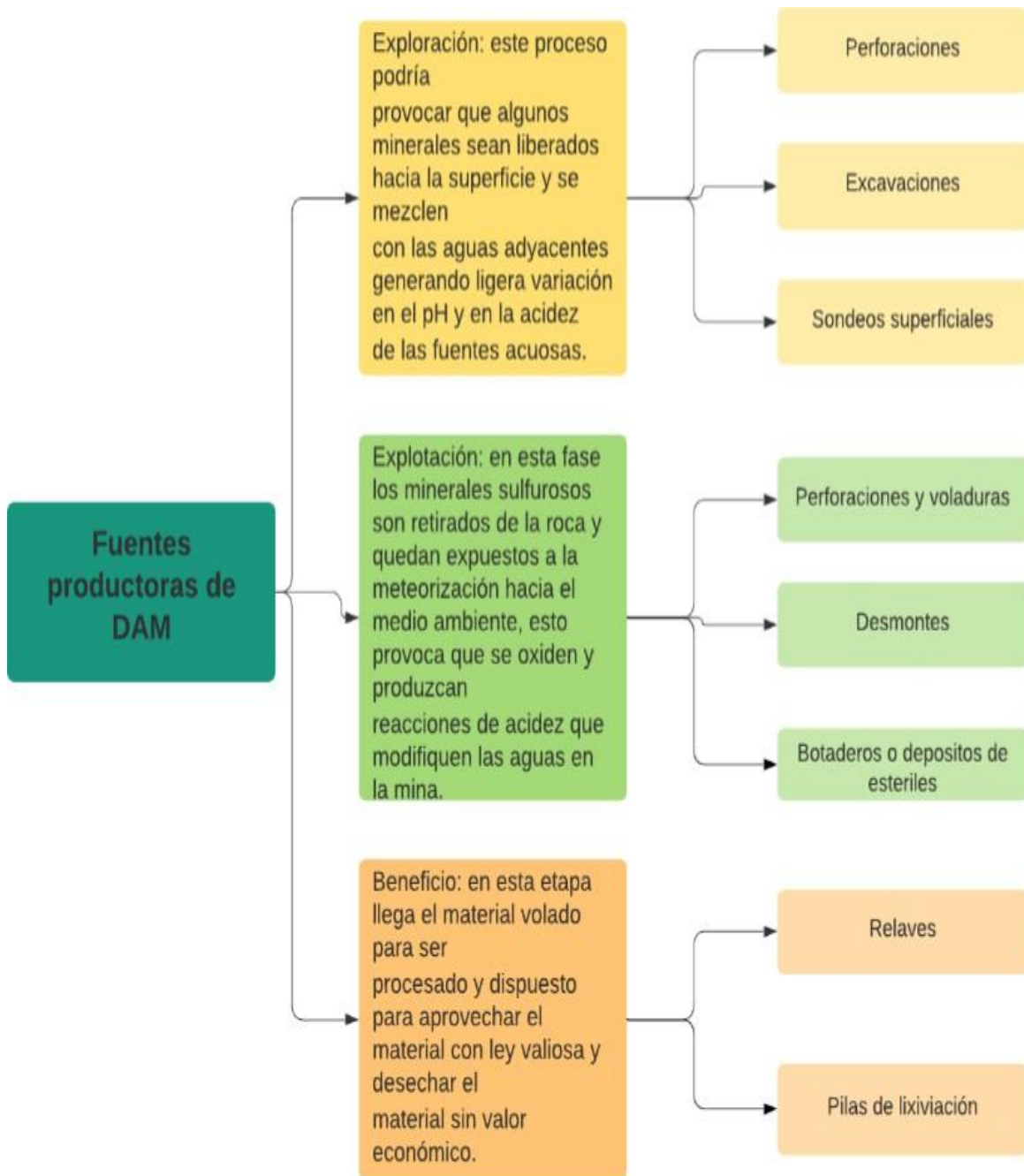
La velocidad de reacción es una variable muy importante, depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita y la pirita, son muy inestables y pueden generar rápidamente aguas ácidas (Aduvire, 2006). Por otro lado, es de gran relevancia resaltar y reconocer que la acidez y un pH bajo no son en sí los factores más críticos en relación con el drenaje ácido; más bien, la preocupación fundamental la constituyen los elevados niveles de metales disueltos. Es así como el drenaje que proviene de la oxidación de minerales sulfurados de una roca que además contiene carbonatos puede ser casi neutro, pero puede contener niveles elevados de metales solubles en pH neutro o alcalino, tales como el zinc, el arsénico o el molibdeno cuya solubilidad no disminuye linealmente (García, 2013); y puede precipitar a los iones solubles de hierro férrico (Fe^{3+}) produciendo hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) como precipitado. Adicionalmente, la presencia de trazas de metales pesados le da carácter de toxicidad al agua. La formación del precipitado depende de la constante del producto de solubilidad y, por lo tanto, del pH del medio acuoso (Salazar et al., s.f.). Las reacciones catalizadas por microorganismos tienen un impacto directo en los procesos de generación ácida, así como en el desarrollo de alternativas de tratamiento (Cadillo, 2018). La caracterización de microorganismos en tales ambientes contaminados es importante para comprender los impactos del DAM en la ecología y para identificar microorganismos que puedan tener propiedades de biorremediación y comprender los mecanismos de tolerancia y remediación de los mismos (Aguinaga et al., 2018).

2.1.3. Mecanismos y fuentes de formación

Para identificar las fuentes generadoras del DAM, es sumamente importante entender que el drenaje ácido se produce bajo condiciones naturales, pero son las actividades mineras las que pueden acelerar mucho su producción porque exponen hierro fresco y superficies de sulfuro (Ríos, Williams y Roberts, 2008). La exposición de roca con presencia de sulfuros reactivos al aire y al agua, son las que pueden acelerar la velocidad de generación de ácido y ocasionar un impacto en el ambiente. El volumen, la concentración, el tamaño de la roca y la repartición espacial de la pirita son los factores que más afectan a la generación de aguas acidas.

En el desarrollo de un trabajo minero, las fuentes primarias de DAM son esas en las que las rocas fueron previamente perturbadas o expuestas, después de realizar algún proceso o actividad como vertederos de roca de desecho, depósitos de mineral, depósitos de relaves, pozos de minas, plataformas o pilas de lixiviación (Abinandan, Subashchandrabose, Venkateswarlu y Megharaj, 2018).

Figura 6. *Fuentes productoras de DAM.*



Fuente: basado en Li Lin, 2013.

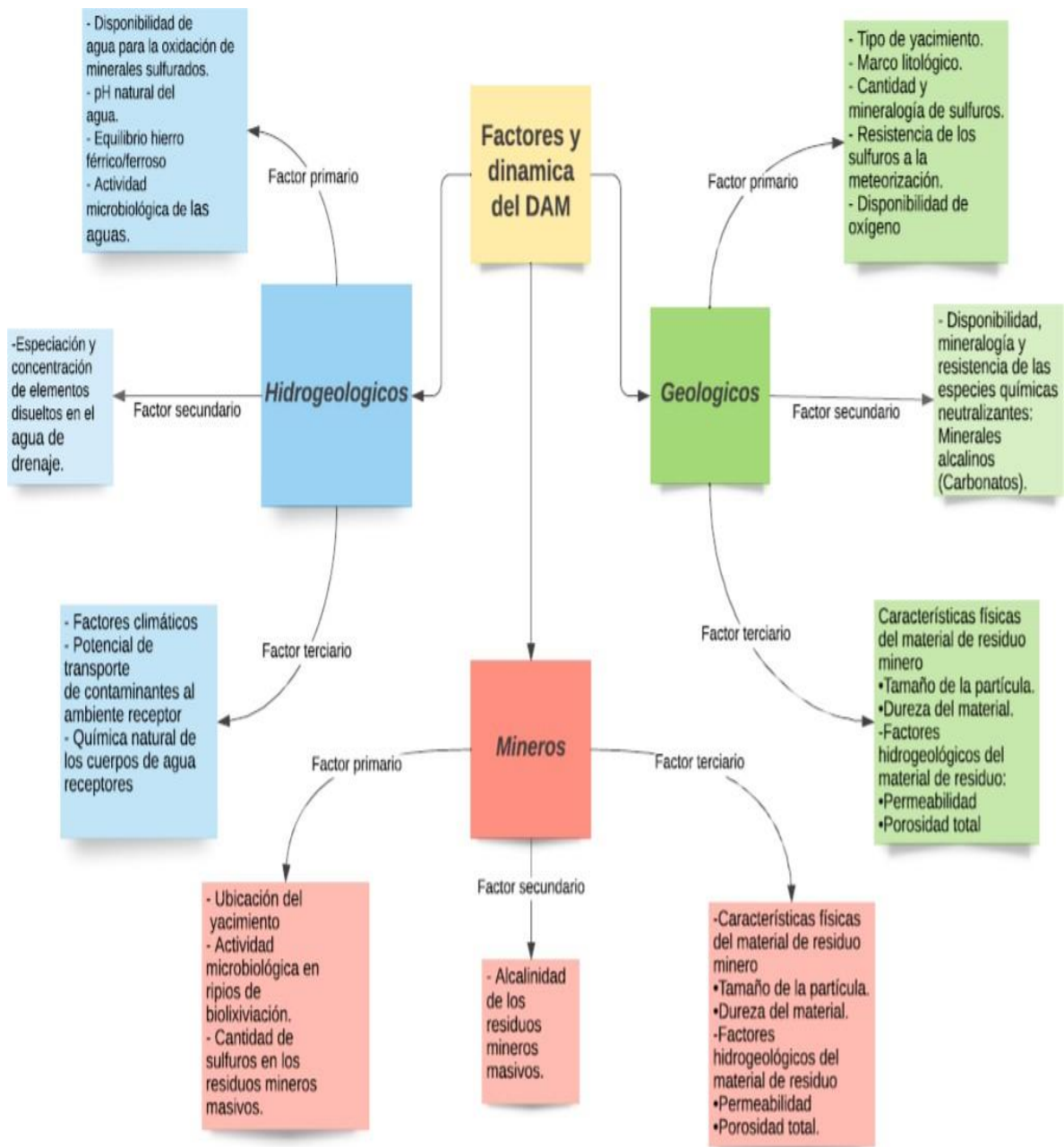
Los relaves son una de las principales fuentes de generación de DAM ya que presentan diversidades mineralógicas y por ende diversas respuestas a los procesos de oxidación que generarán drenajes ácidos con intensidad y

velocidad variable, dependiendo de los minerales contenidos (Li Lin, 2013) y provienen del procesamiento por la vía húmeda o líquida en las plantas de tratamiento y procesos de concentración de minerales.

Los botaderos son zonas donde se almacenan los estériles o desechos mineros, y están altamente influenciados por agentes externos al mismo como, el clima o el grado de saturación al que se vea sometido el material, los que tendrán un impacto directo en la generación de drenaje ácido minero, tanto en la magnitud de la acidez generada, como en el tiempo de reacción (Ibáñez, 2016). Los estériles son generados en los procesos de perforaciones, voladuras, transporte y descarga de material.

La migración a través de los botaderos de estériles y relaves tiene mayor movilidad en flujos superficiales que en la infiltración subterránea, debido entre otros aspectos al elevado volumen de poros en los materiales depositados en estas estructuras y a la solubilidad de los metales presentes en los drenajes (Aduvire, 2006). Después de conocer las principales fuentes, se procede a identificar la dinámica de generación de DAM, la cual depende de las características hidrogeológicas, geológicas y mineros, y de tres tipos de factores, los cuales se presentan en la siguiente ilustración.

Figura 7. Factores y dinámicas del DAM.



Fuente: basado en Barón, 2013.

Los factores primarios determinan la cantidad de ácido que se puede generar en un ambiente determinado, los factores secundarios determinan la cantidad de ácido que puede ser neutralizada naturalmente en un ambiente determinado y los factores terciarios determinan la velocidad con la cual se pueden producir la generación y el transporte de las soluciones ácidas. Identificar todas y cada una de las fuentes potenciales de drenaje ácido de mina, tanto en la etapa de diseño, como en la operación de cada asiento minero, contribuyen a prevenir los DAM y reducir todas las problemáticas asociadas, al igual que el reconocimiento de la dinámica de desarrollo.

2.1.4. Posibles impactos y efectos del Drenaje Acido de Mina sobre el medio ambiente

La relevancia en el estudio de los problemas ambientales, desencadenados de los drenajes ácidos de las minas (DAM), radica principalmente en que tiene efectos negativos en miles de kilómetros de cursos de agua a lo largo de todo el planeta Tierra, afectando a la vida acuática y terrestre circundante, por lo cual se le ha llegado a considerar como el problema ambiental más grande que enfrenta la industria minera (Hudson et al., 2011).

El DAM puede degradar severamente el agua calidad al producir un ambiente desprovisto de la mayoría de la vida acuática y no apto para su uso. La gravedad y la extensión del daño depende sobre una variedad de factores que incluyen la frecuencia, el volumen y química del drenaje y el tamaño y la capacidad de amortiguación de la corriente receptora (Dutta et al., 2017). Por lo tanto, los procesos fisicoquímicos, microbiológicos y

mineralógicos involucrados en la DAM deben entenderse a fondo para evaluar y mitigar sus impactos en el medio ambiente (Peretyazhko et al., 2009).

Una vez expuestos los recursos hídricos al DAM, la calidad del agua superficial adyacente se degrada drásticamente, finalmente se vuelve inadecuada para mantener la biodiversidad; además, los suelos expuestos a DAM se vuelven estructuralmente inestables y muy propensos a la erosión (Roychowdhury, Sarkar y Datta, 2015)

La combinación de pH bajo y altas concentraciones de metales asociados con el DAM puede tener efectos toxicológicos graves en los organismos acuáticos, pues la exposición aguda puede matar directamente a los organismos y la exposición crónica puede generar retraso en el crecimiento, menores tasas de reproducción, deformidades y lesiones (Salazar et al., s.f.). En metales como el cadmio, se conoce que es altamente tóxico para plantas, animales y humanos, y que cuando está presente en formas biodisponibles, existe la bioacumulación tanto en organismos terrestres y acuáticos (Bahamóndez, 2012). Otros metales como arsénico, manganeso y mercurio, típicos productos del DAM son conocidos por ser carcinógenos, por causar dermatitis y desórdenes neurológicos (Zevallos, 2016). Los peces y otros organismos acuáticos son más sensibles que los seres humanos a niveles elevados de metales pesados. Pero, si los metales se encuentran en el agua, generalmente son asimilados por los organismos vivos, se acumulan en los sedimentos y de esta manera pueden ingresar en la cadena alimenticia afectando finalmente al ser humano.

En la tabla 4, se presenta algunas características principales del impacto ambiental que conlleva la generación de aguas acidas de mina.

Tabla 4. Principales características del impacto ambiental generado por aguas acidas de mina.

Propiedad	Especies químicas	Concentración (rangos en solución)	Impacto ambiental
Acidez	H ⁺	pH < 4.5	Pérdida de bicarbonato para los organismos fotosintéticos; degradación y muerte de animales y plantas; reducción en la calidad del agua potable; movilización de iones metálicos; corrosión de estructuras hechas por el hombre.
Precipitación de hierro	Fe ³⁺ , Fe ²⁺ , Fe(OH) ₃ (S)	100 a 1000 mg/l	Decoloración y turbidez en la recepción de agua a medida que aumenta el pH y las sales férricas precipitan, asfixia de los organismos bentónicos y la obstrucción de

Propiedad	Especies químicas	Concentración (rangos en solución)	Impacto ambiental
			branquias de los peces, reducción de la luz que penetra en la columna de agua, incrustación de hierro en las estructuras hechas por el hombre.
Metales Pesados y metaloides disueltos	Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Ni, Hg, As, Sb	0.01 a 1000 mg/l	Degradación y muerte de animales y plantas, bioacumulación, reducción en la calidad de agua potable, contaminación de sólidos y sedimentos.
SDT	Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Si, Mn	100 a más de 10000 mg/l	Reducción de la calidad del agua potable, reducción en la calidad de agua en reserva, incrustación de SDT en las estructuras hechas por el hombre en forma de

Propiedad	Especies químicas	Concentración (rangos en solución)	Impacto ambiental
			sal. Contaminación de sólidos y sedimentos

Fuente: Zevallos, 2016.

Las reacciones generadoras de drenaje ácido no sólo ocurren durante las faenas mineras activas, sino también durante las décadas posteriores. Los bajos pH producidos pueden disolver muchos de los minerales presentes en la mina, causando que el hierro y elementos potencialmente tóxicos como cobre, cadmio y zinc, sean solubilizados y que luego estos puedan ser filtrados o descargados en las corrientes de agua (Bahamóndez, 2012). Según los autores (Salazar et al., s.f.) una de las situaciones más delicadas no es solo la acidez y los altos niveles de sulfato de este tipo de drenajes: son los metales solubles que puede contener, como Fe, Mn, Al, Cu, Cd y metaloides como el arsénico, dependiendo de la mineralogía de las rocas donde es generado el drenaje, sumado a la precipitación de los hidróxidos metálicos que inhiben severamente la reproducción de organismos bénticos.

A pesar de todas las consecuencias e impactos negativos que se desencadena por la acidificación de las aguas de mina, son limitadas las investigaciones que se pueden encontrar acerca de estas alteraciones que se provocan en el medio ambiente y los ecosistemas, posiblemente porque han sido desconocido muchos de los casos de DAM, debido a la informalidad e ilegalidad de los proyectos mineros que se han desarrollado en la historia minera del país y que esta problemática puede presentarse después de varios años de cierre, imposibilitando encontrar el responsable de estas afectaciones en el ambiente. Sin

embargo, la creciente conciencia de la protección del medio ambiente exige una mejor comprensión de las características mineralógicas y el transporte de metales en condiciones extremadamente ácidas. Por lo tanto, se requiere una investigación geoquímica sólida en todas las etapas para desarrollar la remediación efectiva del área de DAM (Xie et al., 2018).

Manejo y control del DAM

2.1.5. Métodos de predicción y prevención

La identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos que se producen en una explotación minera pueden reducir considerablemente muchas de las dificultades que se presentan en las explotaciones mineras. cuando se abandona la mina, es esencial tener el conocimiento más preciso posible de la hidrogeología, la geología, la composición mineralógica de los materiales y el método de extracción y procesamiento del mineral para permitir la prevención, corrección y mitigación del medio ambiente y degradación causada por la operación (Gomes de Oliveira, Tavares, y Rosalino, 2014). La predicción y prevención de los drenajes ácidos de mina son dos procesos fundamentales para evitar las afectaciones e impactos ambientales que provocan estas aguas acidas; además relega la aplicación de tratamientos, los cuales pueden llegar a ser costosos y de efectividad variable.

2.1.6. Predicción

La predicción de la generación ácida debe iniciarse desde la etapa de exploración del yacimiento, para ello debe realizarse la recogida de muestras en zonas mineralizadas y estériles con el fin de efectuar su correspondiente análisis ácido-base descriptivo (Aduvire, 2006). La predicción del potencial de generación ácida y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva ambiental y también desde la económica y está enfocada

en la determinación de los posibles recursos de una mina que sean capaces de generar acidez. El principal objetivo de la predicción acida es determinar, en primer lugar, si un determinado volumen de material o residuo minero es potencialmente generador de acidez; en segundo lugar, determinar la calidad de los drenajes teniendo en cuenta las condiciones medioambientales del lugar (Jimbo, 2019) de donde provienen las fuentes de DAM.

Las pruebas que se emplean para la predicción de DAM son los test estáticos y los test cinéticos. Los primeros están enfocados a determinar si son fuentes importantes de minerales capaces de generar acidez como la pirita, la determinación de sulfuros capaces de oxidarse a sulfatos y por ende generar ácido sulfúrico, el pH pasta de los minerales de estudio, los metales presentes, entre otros (Chaparro, 2015), Uno de los ensayos estáticos más utilizados en la predicción de la generación ácida de mina es la relación ácido/base que se obtiene por comparación entre la máxima acidez potencial representado por el azufre total en la muestra y la neutralización potencial (Aduvire, 2006). Las pruebas estáticas se refieren a la composición geoquímica de una muestra, y no a la velocidad ni a la magnitud de las reacciones que pueden producir o consumir acidez. Por eso, los procedimientos para pruebas estáticas son igualmente aplicables en cualquier región climática o geológica.

Los test cinéticos, que permiten modelar como se comportaría un mineral capaz de generar acidez en el tiempo, a través de estos, se puede conocer en cuanto tiempo se acidificaría un drenaje, a que valores de pH lograría llegar, si los microorganismos son capaces de proliferar en el material de estudio, y que metales presentes en la roca podrían lixiviar (Chaparro, 2015).

Las pruebas estáticas también conocidas como pruebas de contabilidad ácido-base (ABA), se desarrollaron originalmente para predecir la generación de DAM en sitios de minería de carbón y luego se modificaron para minas de metal (Balci y Demirel, 2017). Este tipo de pruebas proporcionan información sobre las características de la roca y el potencial total para la generación de ácido, independientemente del tiempo. Aparte de estos dos tipos de ensayos se han venido implementado test a escala de campo para le predicción de los materiales generadores de acidez, ya que estos arrojan resultados más reales porque tienen en cuenta el régimen climático (periodos de verano e invierno), el tamaño del mineral es el proveniente de la mina, con lo cual se minimizan errores por disminución de tamaño en la trituración necesaria para los test de laboratorio (Chaparro, 2015).

2.1.7. Prevención

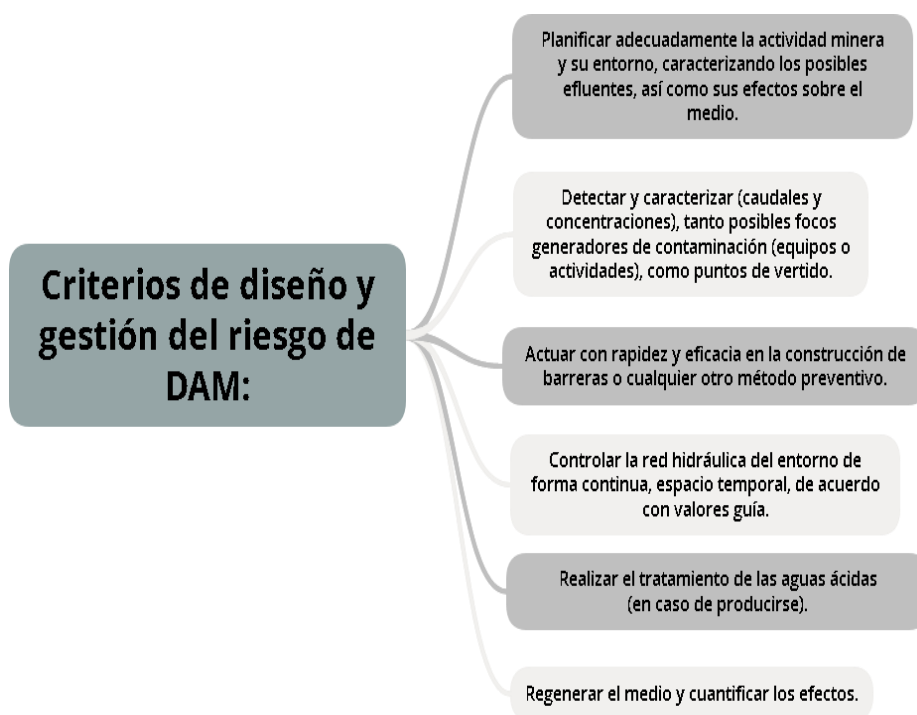
La prevención de la contaminación derivada de las actividades mineras se relaciona estrechamente con los métodos de explotación (subterránea o superficial), al igual que las condiciones climáticas. En la formación de DAM además de las variables anteriores se toman en cuenta las propiedades de generación (origen, desagüe, grado de actividad, etc.), características (físicas y químicas) y carácter (permanente y temporal) del efluente, de ahí puede variar la eficiencia de cada método preventivo y/o de tratamiento, dado que, cada caso es diferente.

La predicción de la generación ácida debe iniciarse desde la etapa de exploración del yacimiento, para ello debe realizarse la recogida de muestras en zonas mineralizadas y estériles con el fin de efectuar su correspondiente análisis ácido-base descriptivo. Estos resultados preliminares permitirán a que en la fase de planeamiento de la mina se considere o no el tratamiento de los drenajes ácidos que podrían generarse en la fase de explotación y cierre de la instalación (Aduvire, 2006). Toda vez que se han realizado los estudios de predicción, y se ha determinado que existen minerales potenciales generadores de acidez dentro de la mina, se proceden a realizar los diferentes trabajos y actividades de prevención para evitar la generación de DAM (Chaparro, 2015). Con respecto a las formas de actuar, cabe distinguir aquellas acciones que se orientan hacia el objetivo de reducir la formación de contaminantes, y aquellas otras que implican el tratamiento de las aguas contaminadas.

Los métodos preventivos se basan en la eliminación de alguno de los elementos esenciales en la generación de aguas ácidas (sulfuro, oxígeno, humedad o bacterias catalizadoras), tales como: impermeabilización de escombreras, cauces y áreas de riesgo potencial; construcción de socavones de desagüe y canales perimetrales; retirada, segregación y depósito selectivo de los materiales potencialmente acidificadores; sellado de comunicaciones con el subsuelo,; enmienda con materiales neutralizadores; adición de bactericidas (sulfato de lauril sodio, benzoato de potasio, etc.) y enmiendas (Baquero et al., 2008). Las técnicas preventivas para el control de la formación de aguas ácidas se pueden clasificar en tres grupos de métodos: los métodos de barrera, que tienen como objetivo el aislar los sulfuros de los elementos oxidantes o del sistema de transporte hidrológico; los métodos químicos, que modifican la composición de las soluciones del agua que entra en contacto con los

materiales rocosos y limitan las posibilidades de reacción, y los métodos de inhibición bacteriana, que rompen el proceso de oxidación cíclico catalizado biológicamente (Li Lin, 2013). Cuando existe riesgo de generación de aguas ácidas, con el fin de eliminar o, al menos, minimizar su aparición, se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

Figura 8. *Criterios de diseño y gestión del riesgo del DAM.*



Fuente: el autor.

Los efectos de la contaminación que provoca el DAM, se distribuyen por grandes áreas a través de los acuíferos y/o arroyos y ríos, lo que implica altos costos y dificultades técnicas para la recuperación de los recursos deteriorados (Kirschbaum y Murray, 2011). Una forma efectiva de evitar la generación de acides en las aguas de mina y sus impactos,

es mediante el control y la eliminación de los parámetros y las condiciones que favorecen la formación de aguas ácidas. Con este tipo de medidas se puede lograr limitar la formación de aguas ácidas mediante la eliminación de los mecanismos de oxidación de los elementos contaminantes contenidos en los efluentes. Esto se puede conseguir mediante la exclusión de uno o varios de los elementos protagonistas de las reacciones de oxidación y reducción de los sulfuros, o controlando el medio en el que se encuentran estos sulfuros.

Otro de los pasos a seguir para evitar o disminuir la generación de DAM y sus consecuencias, es mediante la implementación de un detallado estudio y planificación del cierre de la mina y disposición final de los residuos mineros en las etapas tempranas de cada yacimiento. Con los métodos preventivos se puede ahorrar recursos económicos, humanos, etc., a las compañías mineras en tratamientos y lo más importantes es que no se vería afectado el medio ambiente ni las poblaciones aledañas a los proyectos extractivos.

2.1.8. Tratamiento para el DAM

La gravedad de las afectaciones ambientales que conllevan la contaminación por drenajes ácidos de mina ha generado una búsqueda y un interés investigativo para encontrar nuevas formas de tratamientos para esta problemática que provoca el sector minero, el propósito es encontrar alternativas económicamente factibles, partiendo desde, las características de cada proyecto extractivo, pues cada uno de los casos de DAM es totalmente diferente a cualquier otro; desde este punto de vista se debe tomar en cuenta los aspectos económicos, ambientales, factores regulatorios y sociales.

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de técnicas para tratar los drenajes ácidos, a manera general los sistemas de tratamiento para DAM se dividen en dos grandes grupos: activos y pasivos. Varios sistemas viables para enfrentar el drenaje ácido de mina han sido identificados y probados en laboratorio y escala piloto.

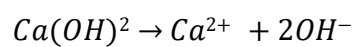
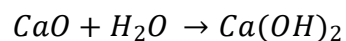
2.1.9. Tratamientos activos

Los sistemas activos generalmente se refieren a la aplicación continua de materiales alcalinos para neutralizar los efluentes ácidos de la mina y precipitar los metales. Para tratar los drenajes ácidos de mina por métodos químicos, comúnmente denominados tratamientos convencionales, es necesario conocer a fondo las reacciones de oxidación que llevan a la formación de sustancias de carácter ácido (Salazar et al., s.f.).

Las tecnologías convencionales para el tratamiento del DAM incluyen varios métodos fisicoquímicos, que implican el uso excesivo de productos químicos y capital, al requerir un suministro de agente neutralizante, al emplear una gran cantidad de energía y al demandar personal para gestionar el proceso de tratamiento. El método activo consiste en una neutralización mediante la adición de un álcali, oxidando el ion ferroso a la forma férrica soluble, y la remoción de metales precipitantes por el proceso de sedimentación (Espinosa et al., 2016). Este método se usa más ampliamente para tratar DAM al agregar materiales de líneas alcalinas (por ejemplo: CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3) (Peiravi, Mote, Mohanty y Liu, 2017).

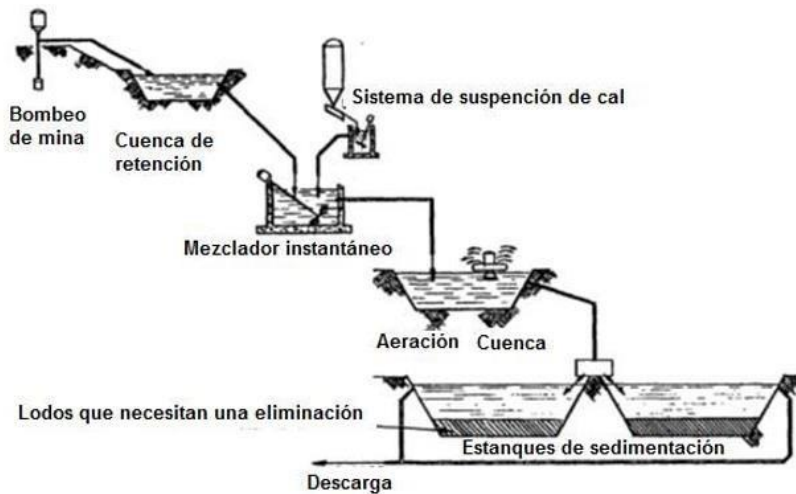
El tratamiento activo depende de las minas en funcionamiento, mientras que los sistemas pasivos se usan generalmente como herramientas complementarias para la recuperación de sitios mineros cerrados o abandonados, principalmente porque usan materiales naturales o residuales que involucran menores inversiones de capital y energía (Genty et al., 2018). En el contexto del desarrollo sostenible, el tratamiento activo no se considera una opción viable para la remediación a largo plazo de la generación de DAM en minas cerradas o abandonadas (Ouakibi, Hakkou y Benzaazoua, 2014), pues tienen la desventaja de ser costosos y generar grandes cantidades de lodos, con los consecuentes problemas asociados a su disposición (Salazar et al., s.f.).

El tratamiento activo más empleado es el sistema convencional el cual se basa en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados (Aduvire, 2006); Además, son utilizados agentes floculantes poliméricos para acelerar la separación sólido/líquido. El proceso más común es donde es utilizada la cal viva (CaO), por su bajo costo y alta eficiencia, pues el requerimiento de cal es menor a 0.1 kg/1000l, para minas con drenajes con pH entre 3.5 y 5.0 (Montoya, 2015). Esta sustancia alcalina, presenta las siguientes reacciones en presencia de agua y metales.



El proceso convencional es normalmente dividido en dos etapas: neutralización de agua ácida con cal y precipitación de los iones metálicos, en forma de hidróxidos seguido de espesamiento y/o filtración del lodo formado (Cadorin, Carissimi y Rubio, 2007).

Figuro 9. *Proceso de neutralización con cal convencional.*



Fuente: (Zevallos, 2016)

El proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5; con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso, posteriormente el agua pasa por gravedad a los tanques de aireación, donde el oxígeno atmosférico se incorpora al agua mediante unas turbinas de agitación y se consigue la oxidación del hierro ferroso y el manganeso (Aduvire, 2006). Cuando se ha conseguido que el drenaje sea neutralizado y el ion ferroso

oxidado, la etapa siguiente es la sedimentación, en la cual son removidos los lodos generados (Espinosa et al., 2016).

Dentro de las ventajas del método convención esta que es una tecnología eficaz para el tratamiento de las aguas muy ácidas y el proceso no se ve afectado por las fluctuaciones estacionales de temperatura (Cadorin et al., 2007). Esta técnica tiene una limitación cuando se requiere alcanzar un pH muy alto para precipitar metales como el manganeso (Aduvire, 2006). Por otra parte, este método exige productos químicos, personal para operación, mantenimiento continuo de los equipos y estructuras, al igual que un manejo adecuado de los residuos producidos (lodos), lo que requiere una adecuada planeación para su disposición, para conseguir reducir costos y afectaciones ambientales.

Con el propósito de realizar una identificación de otros tratamientos activos que han sido estudiados y donde también se han encontrado altos resultados en su eficiencia, sin desconocer que como la mayoría de estos tratamientos poseen unos costos relativamente elevados, además de generar residuos y lodos contaminantes.

Tabla 5. *Tratamientos activos.*

Proceso	Descripción	Observaciones
Electrodialisis	Movilización iónica producida gracias a fuerzas de transferencia eléctricas a través de membranas permeables. La intensidad de	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de mantenimiento de las celdas.

	<p>corriente necesaria depende de la concentración de la solución.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Límite de concentración de Fe en solución entrante = 1 mg/l. Necesario tratamiento previo de la solución. • Problemas por la evacuación del concentrado. • No se puede usar para afluentes de dureza superior a 1ppm.
<p>Extracción por solvente</p>	<p>El extractante se mezcla al afluente mediante agitación. Luego, este complejo extractante es separado de la solución mediante gravedad obteniendo una corriente libre de contaminante y una línea con extractante cargado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se logran alcanzar eficiencias de entre 85 – 90%. • Permite reuso de extractantes.
<p>Precipitación de sulfuros</p>	<p>Simula la precipitación de hidróxido, convirtiendo los compuestos metálicos solubles en compuestos de sulfuro relativamente insolubles a través de</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de bajos tiempos de retención hidráulica. • Puede generar emisiones de gases como sulfuro de hidrógeno

	la adición de agentes de precipitación tales como sulfuro de sodio, hidrosulfuro de sodio, sulfuro ferroso o sulfuro de calcio.	
Neutrólisis	Combinación de neutralización y ósmosis inversa mediante la recirculación del concentrado del proceso de ósmosis a través de la etapa de neutralización.	<ul style="list-style-type: none"> • Elimina la capa de CaSO_4 que se formaba en la ósmosis inversa • La acumulación de Mn puede causar problemas
Oxidación por ozono	Oxidación de ión ferroso a férrico seguida de neutralización	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor control y menores costes que la oxidación convencional • Suplementaria al proceso de neutralización
Ablandamiento químico	Se aplican las primeras cuatro etapas del proceso de neutralización convencional (homogeneización, neutralización, oxidación y sedimentación), luego el efluente entra a un tanque de mezcla rápida para la adición de químicos; esta etapa es seguida de la floculación, sedimentación, recarbonatación,	<ul style="list-style-type: none"> • es empleado como un proceso de tratamiento para remover iones disueltos del DAM

	filtración y cloración para alcanzar niveles aceptables de pureza.	
--	--	--

Fuente: basado en Aduvire 2006 y Fundación Chile 2015.

2.1.10. Tratamientos pasivos

Los sistemas de tratamiento pasivos constituyen una de las herramientas más atractivas para las empresas mineras, especialmente en la fase de abandono y desmonte ya que estos requieren un mínimo de intervención humana, rara vez requieren manejo de subproductos y no es necesario el uso de electricidad y reactivos químicos (Chaparro, 2015). Los métodos pasivos más utilizados son reactores bioquímicos, humedales artificiales (aeróbicos y anaeróbico), drenajes de piedra caliza (aeróbico y anóxico), sucesivos sistemas productores de alcalinidad (SAPS, también llamado RAPS) y barreras reactivas permeables (PRB) (Torregrosa, Schwarz, Nancuqueo y Balladares, 2019). Los tratamientos pasivos a su vez pueden dividirse en biológicos y químicos; el biológico se caracteriza por utilizar bacterias anaerobias, con el fin de generar cambios en los componentes químicos y poder degradarlos o extraerlos mediante las reacciones en sus actividades metabólicas; en cuanto a los tratamientos químicos, éstos se basan en reacciones de oxidación-reducción (Romero, 2016). En la tabla 5 se muestran las bacterias asociadas al tratamiento de residuos de minería.

Tabla 6. *Bacterias asociadas al tratamiento de residuos de minería.*

Microorganismo	pH	Temperatura	Nutrientes
Thiobacillus ferrooxidans	Entre 1,5 y 2	Mesófilas	Fe, S, C
Thiobacillus thiooxidans	Entre 2 y 3		
Thiobacillus intermedius	Entre 2 y 3		
Thiobacillus napolitanus	Entre 2 y 3		
Thiobacillus acidophilus	Entre 2 y 3		
Thiobacillus thioparus	Entre 2 y 3		
Thiobacillus ferrooxidans	Entre 2 y 3		
Thiobacillus TH2 y TH3	Entre 6 y 7	Termófilas	
Acidiphilium cryptum	Entre 1,5 y 2,5	Mesófila	
Leptospirillum ferrooxidans	Entre 1 y 2		
Leptospirillum ferriphilum	Entre 1,5 y 2,5		
Leptospirillum thermoferrooxidans	Entre 1,5 y 2,5		
Sulfolobus	Entre 1,5 y 2,5	Termófilas	
Heterotrofos	Entre 2 y 3	Mesófilas	
Metallogenium sp.	Entre 2 y 3		
β-Proteobacteria “Ferrimicrobium acidiphilum	Entre 1,5 y 2,5		
Actinobacteria Ferroplasma acidiphilum	Entre 1,5 y 2,5		
Oxidación hierro y sulfuro Acidithiobacillus ferrooxidans	Entre 1,5 y 2,5		

Fuente: Salazar et al., s.f.

Los métodos de tratamiento pasivo dan un buen rendimiento en la neutralización del pH y la eliminación de metales pesados (De la Cruz, 2006), presentando altos porcentajes de remoción de los sulfatos y metales, en donde se han logrado valores superiores al 90% en tratamientos con microorganismos de los géneros *Thiobacillus* y *Leptospirillum* (Sanchez y Ferreira, s.f.). Este tipo de tratamiento se viene convirtiendo en una excelente alternativa, que mediante el uso de plantas y microorganismo como bacterias y hongos que se utilizan para generar alcalinidad e inmovilizar metales, aportando a la remediación del DAM, de manera eficiente, económica (en comparación a los tratamientos activos) y ecológica. Los microorganismos que habitan en condiciones ambientales tan extremas se adaptan naturalmente a los efectos tóxicos de concentraciones más altas de metales pesados y también poseen la capacidad única de reducirlos a formas menos tóxicas (Panda, Mishra y Akcil, 2016).

Para llevar a cabo alguno de los métodos pasivos se debe considerar dos objetivos principales en el diseño del sistema de tratamiento pasivo (i) generar suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez, y (ii) disminuir la carga de metales mediante oxidación / hidrólisis y mecanismos de precipitación (Ouakibi et al., 2014). Los tratamientos pasivos que se han desarrollado en estos últimos años no hacen sino emular de un modo explícito algunos de los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en la naturaleza (Panda et al., 2016). También se pueden desarrollar sistemas pasivos de múltiples pasos ya que se puede presentar una eficiencia limitada a largo plazo de los sistemas de una sola unidad. Este tipo de tratamiento pasivo consisten en combinaciones de unidades de tratamiento

químico y biológico, tanto aeróbico como anaeróbico. Algunos sistemas de tratamiento de múltiples pasos pueden estar compuestos de sustratos alcalinos dispersos (DAS) y unidades de aireación en cascada o estanques de decantación; Otros combinan reactores bioquímicos pasivos (PBR) con drenajes de piedra caliza anóxica, cenizas de madera o biofiltros de turba (Rakotonimaro, Neculita, Bussièrre, Genty y Zagury, 2018).

Por lo que se considera anteriormente el tratamiento pasivo representa una alternativa sostenible, que se utiliza principalmente como un complemento efectivo para la recuperación de sitios cerrados y abandonados, principalmente en regiones templadas y semiáridas; los climas fríos son desafiantes en el contexto del drenaje de minas porque bajas temperaturas pueden afectar negativamente la eficiencia de estos tratamientos (Ben Ali et al., 2019).

Uno de los métodos pasivo que se han venido implementando de forma muy fuerte para el manejo de los DAM son los humedales artificiales. Los humedales son un complejo sistema de plantas, microorganismos y sustrato que juntos funcionan como un filtro biogeoquímico, son sistemas de depuración basados en macrófitos, que consisten generalmente en un monocultivo o policultivo de macrófitos, dispuestos en tanques, lagunas o zanjas poco profundas y con un tiempo de retención superior al de los sistemas convencionales (Salazar et al., s.f.) y se destacan como un proceso típico de restauración ecológica pasiva para el DAM, ya que tiene la capacidad de acumular grandes cantidades de metales con ventajas económicas sin necesidad de insumos químicos y bajas necesidades de mantenimiento (Alsaiani y Tang, 2018).

La eliminación de metales pesados en humedales se debe principalmente a procesos como fitoextracción que se da a través de las hojas, fitovolatilización que permite que esos componentes extraídos por la planta sean volatilizados, fitodegradación donde por las raíces se transforman los contaminantes en nutrientes para las plantas, y la fitoestimulación donde los microorganismos estimulan el crecimiento de partes de las plantas que requieren esos contaminantes como fuentes de nutrientes (Salazar et al., s.f.). Los humedales se ha aplicado con éxito en muchos lugares para tratar drenaje de minas, pero son generalmente aplicados al drenaje de minas de carbón, que es relativamente bajo en metales y solo ligeramente ácido en comparación con los DAM de minas de metal (Hallberg y Johnson, 2005). Este método de tratamiento pasivo ofrecen varias ventajas porque son relativamente económicos para construir y operar, fáciles de mantener, eficaces y confiables para el tratamiento de aguas residuales de mina (Gamonal, s.f.). El sistema de humedales artificiales o construidos se clasifican en humedales aerobio y anaerobios, y se emplean según las características hidráulicas, biológicas, climáticas y de las necesidades de tratamiento del proyecto minero que produce DAM.

Casos de DAM en algunos distritos mineros del país

Colombia es un país que le apuesta cada vez más a la explotación de recursos mineros, y más que nada a realizar esta actividad económica de forma sostenible, bajo el eslogan de “minería bien hecha”. Por eso en este capítulo se mencionan algunos casos de DAM y de los tratamientos que se han implementado, que se han estudiado y/o que actualmente se investigan. Esto con el propósito de encontrar métodos de tratamientos adecuados en términos técnicos, económicos y ambientales para esta problemática; la cual, resulta ser una de las más preocupantes por sus afectaciones en los recursos hídricos, en los ecosistemas y en la salud de los seres humanos y por ser la mayor responsabilidad ambiental del sector minero.

2.1.11. Bacterias reductoras de sulfato (BSR).

Este estudio fue realizado en Bucaramanga Santander por el Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander. El departamento de Santander tiene una baja participación con relación a las principales regiones mineras del país, sin embargo, dado los impactos negativos que genera los DAM al medio ambiente y a la salud humana este grupo universitario de investigación plantea el uso de humedales anaeróbicos para el tratamiento de DAM, como método de manejo de las aguas acidas, principalmente las generadas por explotaciones mineras de carbón.

Las bacterias reductoras de sulfato son un tipo de bacterias que generan sulfuros metálicos como formas insolubles con capacidad de neutralización incluso en los drenajes ácidos de mina (Abinandan et al., 2018). Las BSR, oxidan los compuestos orgánicos simples (representados por la fórmula CH_2O) formando H_2S e iones bicarbonatos en condiciones neutras de pH, donde la reducción de sulfatos es óptima (Pacheco y Domínguez-de-Bazúa, 2007).

Este trabajo se enfocó en aislar tres diferentes especies de bacterias sulfato reductoras estas son: *Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfomonas pigra* y *Desulfobacter* spp para la remoción de metales de soluciones acuosas, con el fin de estudiar su posible aplicación en el tratamiento y la remoción de los metales pesados presentes en los Drenajes Ácidos de Minas de Carbón (DAMC) (Gelvez et al., 2008).

En el proceso investigativo se procedió a aislar e identificar cepas de bacterias sulfato reductoras (BSR) a las cuales se les evaluó su capacidad para reducir sulfato y metales pesados, mediante el uso de humedales a escala laboratorio, a partir de una disolución preparada a composición idéntica a los DAM de carbón (Gelvez et al., 2008). Para el tratamiento de los DAM mediante BSR se llevaron a cabo las siguientes etapas de aislamiento, identificación bioquímica y cinética de crecimiento de los microorganismos, posteriormente, la reducción de contaminantes presentes en disoluciones sintéticas, a concentraciones similares a las de los DAM, utilizando las BSR previamente aisladas (Gelvez et al., 2008).

Los resultados que se obtuvieron fue un alto porcentaje de remoción de metales como hierro, níquel, cinc, cobalto, pero una baja remoción para el manganeso. Por otra parte, se observó que en términos generales la velocidad del tratamiento de remoción con las BSR fue lenta. También se encontró que las colonias de BSR aisladas pueden sobrevivir y facilitar el tratamiento de Drenajes Ácidos de Minas (DAM) en ambientes con pH entre 4,7 y 5,0.

Las técnicas de tratamiento donde se emplean BSR, vienen siendo muy empleadas y con resultados positivos, pues estas bacterias pueden resistir altas concentraciones de metales y sobre vivir a bajos valores de pH pudiendo remediar los DAM con resultados de remoción superiores al 95% para Fe, Ni, Co, zn y Pb; el empleo de cultivos mixtos de BSR puede potencializar aún más la remoción de metales.

2.1.12. Biomasa de absorción

El método de biomasa de absorción consiste en que el metal contaminante que compone el DAM se adhiera a la pared celular de la biomasa. Para este trabajo se utilizaron cepas de la especie *Chlorella* y *Scenedesmus* pertenecientes a la división de las Chlorophytas, posteriormente se procedió a la toma de una muestra drenaje ácido de mina de carbón en el sector Tirrá de la vereda el Pedregal del municipio de Tasco en el departamento de Boyacá, después de la identificación de los tipos de especies de microalgas, se resolvió a emplear la especie *Chlorella* de esa fuente, la cual se aisló para su cultivo y posterior utilización en la evaluación de remoción de hierro y sulfatos. A

continuación, se procedió a la caracterización fisicoquímica del DAM, para finalizar con la evaluación del tratamiento.

(Estupiñán, 2015) en su trabajo de investigación denominado “evaluación de un tratamiento para drenaje ácido proveniente de una mina de carbón” señaló que en general el proceso biológico de absorción tuvo un alto rendimiento con respecto al hierro, pero tuvo un casi nulo efecto en cuanto a la concentración de iones sulfatos. Lo que significa que, aunque estos tipos de biomasa (*Chlorella* y *Scenedesmus*) presentaron una buena capacidad de remoción de hierro 86,75% *Chlorella* y 92,77% *Scenedesmus*, requiere de mayor investigación para identificar el nivel de remoción de los demás metales pesados, que generalmente hacen parte del DAM, ya que en este estudio solo se presenta el nivel de eficiencia para los sulfatos, hierro totales y sólidos suspendidos totales. Sin embargo los autores (Bwapwa, Jaiyeola y Chetty, 2017) mencionan que mediante la técnica de biomasa de absorción se podrían reducir efectivamente concentraciones prohibitivas de Mn, dando como resultado bajos niveles de Mn en el ambiente.

Por tanto, se reconoce que este método físico y biológico puede ser una alternativa económica y eficiente como método de tratamiento de DAM, que tan solo presenta la necesidad de estudios más avanzados para concretar sus ventajas y beneficios.

2.1.13. Compost de champiñón como enmienda orgánica

La investigación sobre compost de champiñón como enmienda orgánica que fue desarrollada por (Forigua et al., 2017), donde la finalidad era evaluar el compost de champiñón como enmienda de carbono orgánico para promover sulfato-reducción y precipitación de metales durante la formación de DAM; Además de determinar la actividad microbiana con base en la enzima DHs y los índices de saturación de las especies químicas presentes en el lixiviado.

En la realización de esta investigación se ejecutaron muestreos de substratos orgánicos y del estéril de carbón, estos fueron colectados en la mina los Pinos, asociada a la empresa Uniminas Ltda; ubicada en la vereda Falda de Molino del municipio de Guachetá Cundinamarca, este municipio hace parte de distrito minero Zipaquirá.

En esta mina se construyeron cinco celdas en duplicado con capacidad de 2,4 L, Tres celdas contenían 300 g de mezcla de compost de champiñón y estéril de carbón (en peso seco) en porcentajes de 40:60, 25:70, 60:40 y dos celdas fueron asignadas como controles, una con 300 g de compost de champiñón y la otra con 300 g estéril de carbón. Finalmente, las celdas se dejaron en aclimatación durante una semana a temperatura ambiente ($17,0 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$).

En el análisis de los resultados de esta investigación se concluyó que el uso de compost de champiñón como enmienda orgánica sobre estériles de carbón con alto contenido de azufre pirítico mostró resultados promisorios para establecer condiciones sulfato-reductoras, inmovilizar los metales e incrementar el pH y la actividad microbiana durante la formación del DAM (Forigua et al., 2017). Estos resultados confirman que en la remoción de los metales participan BSR que a través de su actividad metabólica reducen el sulfato a sulfuro que químicamente reacciona con los metales para generar sulfuros metálicos. En este orden de ideas se puede inferir que es una técnica de tratamiento que se puede emplear en otras regiones mineras del país, ya que es un método técnicamente eficiente, económicamente viable, que se ajusta a las necesidades y a las obligaciones ambientales que tiene el sector minero para el manejo de DAM.

2.1.14. Sistemas reductores de sulfato y productores de alcalinidad

En la tesis de Johanna Díaz, estudiante de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales, la cual tiene por título “tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato - Caldas” se realizó un estudio con el objetivo de conocer algunas alternativas de tratamiento que disminuyan el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido. Esta investigación se basó principalmente en el manejo de DAM de la mina cascabel mediante la implementación de sistemas reductores de sulfato y productores de alcalinidad.

Para este estudio se seleccionó un punto para el muestreo de agua superficial, que corresponde a la Mina Cascabel, esta mina fue escogida puesto que es una de las minas con el más alto drenaje ácido, además es una de las 27 minas que drenan sus aguas a la quebrada Cascabel, la cual se ha convertido en un vertedero de residuos, con alta contaminación química.

El mecanismo utilizado para el desarrollo de este trabajo se basó en el análisis de muestras de agua las cuales fueron enviadas al laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Medellín Antioquia. Los resultados obtenidos en la medición del potencial de hidrogeno o pH en el drenaje de agua de la mina muestran características ácidas con unos valores que oscilan entre 3 – 4, lo cual no es adecuado para la naturaleza. En cuanto a los metales pesados, se presentaron concentraciones elevadas de: Aluminio (Al), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn).

Al finalizar esta investigación se observó que esta técnica de tratamiento logra aumentar el pH y disminuir los sulfatos de oxígeno disuelto y la concentración de algunos metales como lo fue en el aluminio, cobre, y hierro; pero que para otros metales como el arsénico, el mercurio, el cadmio, el manganeso y el zinc, los niveles de disminución son bajos y no pueden alcanzar los valores requeridos para dar cumplimiento con lo exigido en la normatividad. Desde este punto de vista el autor (Díaz, 2013), sugiere implementar otro tipo de tratamiento como son las lagunas sedimentadoras y los lechos filtrantes con lo cual se espera la reducción de sus concentraciones en el agua, disminuyendo así la problemática ambiental por DAM que se presenta en la quebrada cascabel.

2.1.15. Humedales construidos

El estudio sobre los sistemas de humedales construidos desarrollado por Jose Luis Galván Usma, se ejecutó en el laboratorio de procesos biológicos ubicado en la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el fin de realizar unos montajes experimentales, implementando dos tipos de organismos vivos dentro de los humedales (plantas y algas), para el tratamiento de los DAM a escala de laboratorio. Las plantas selectas para el estudio fueron las *Phragmites australis*. En cuanto a las algas, fueron tomadas de los sedimentadores de la planta de potabilización de la ciudad de Pereira, Aguas y Aguas de Pereira y fueron seleccionadas debido a que se encuentran en contacto con aluminio. Los organismos implementados en estos sistemas fueron alimentados con nutrientes para favorecer su crecimiento, esta alimentación se realiza por medio de tandas e inundando los humedales. Posteriormente se adecuaron 7 humedales construidos en un revestimiento impermeable de fibra de vidrio, a continuación, se realizó la evaluación de la remoción de los metales pesados y el análisis de estos metales en las plantas, algas y medio filtrante.

Como resultados de esta investigación, el autor (Galván, 2016) logra establecer que las diferentes configuraciones de humedales tienen la capacidad de remover los metales pesados objetivo utilizados los cuales fueron zinc y plomo a diferentes concentraciones, también que estos sistemas con las plantas utilizadas pueden manejar adecuadamente valores de pH bajos. Otro factor positivo es que los resultados muestran que estos sistemas tienen la capacidad pasado un tiempo, de ofrecer una recuperación y tienden a volver a su estado estable nuevamente, razón por la que termina por ser una magnífica opción de

tratamiento para las minas abandonadas que generan DAM. En cuanto a los tipos diferentes de humedales evaluados, se registró que el humedal de flujo horizontal plantado presenta una mayor remoción y estabilidad del plomo principalmente en la segunda fase comparándolo con el zinc.

Un sistema aerobio suele consistir en una o varias celdas conectadas por las que circula el agua lentamente por gravedad, estableciéndose un flujo horizontal superficial (Aduvire, 2006). Y se compone de la planta *Typha* y otras vegetaciones superficiales del humedal, sedimentos relativamente impermeables provenientes de la tierra, arcilla o provenientes de la mina (Pérez, 2008).

Entre los numerosos procesos que se dan en un humedal aerobio, tenemos: la oxidación de metales, precipitación y coprecipitación, además de la filtración de la materia en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los materiales del sustrato, la bioacumulación de metales en las raíces y partes emergentes de las plantas (Aduvire, 2006). Esta forma de humedal es más eficiente para los drenajes alcalinos pues se requieren de pH 5.5 para que los metales se precipiten y se pueda formar óxidos e hidróxidos (Chaparro y Ruiz, 2018). En este tipo de humedal anaerobio, el agua de mina fluye por gravedad y el incremento del pH hasta niveles cercanos al neutro se debe a la alcalinidad de los bicarbonatos que se generan en el sistema a partir de la reducción anaerobia del sulfato y la disolución de la caliza (CaCO_3), para evitar que se produzcan procesos aerobios que desencadenen la generación de acidez metálica a través de la hidrólisis de algunos metales se recurre al pretratamiento del agua ácida con caliza en condiciones atmosféricas (Aduvire, 2006). La reducción del hierro por parte de bacterias es activada a niveles bajos

de pH y estas pueden sobrevivir en ambientes con poco oxígeno, Cuando el oxígeno es removido del sulfato, el sulfito es libre para reaccionar con los metales (como el Fe, Mn y Al) y precipita como sulfitos metálicos (Chaparro y Ruiz, 2018).

2.1.16. Oxidación química

El estudio sobre el tratamiento de DAM mediante el método de oxidación química consistió en la evaluación de muestras representativas de agua proveniente de un tanque de almacenamiento por medio de un muestreo puntal tomadas en la mina de carbón Carbocoque, ubicada en Lenguazaque Cundinamarca.

En esta investigación de tipo experimental se evaluaron algunas variables como los agentes oxidantes, la concentración y el tiempo en dos diferentes niveles, que fueron alto y bajo. Estos experimentos se realizaron en 8 ensayos, los cuales se llevaron a cabo por triplicado. Posteriormente, en estas muestras se llevó a cabo una caracterización química y física, a través de la medición de parámetros tales como: DQO, turbidez, conductividad, pH y presencia de sulfuros.

En la aplicación de los agentes oxidantes hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno, se presentó una disminución en los parámetros físicos como turbidez y químicos como concentración de iones hidronio, sulfuro y DQO en drenajes ácidos, sin embargo es en el experimento 4, donde se emplea el hipoclorito de sodio donde se registran los mejores

resultados. En este orden de ideas, se analiza que podría ser el agente oxidante más adecuado para disminuir la acidez en el drenaje ácido de mina.

El análisis de los resultados se ejecutó a través del software MiniTab, aplicando análisis de componentes principales (PCA), el cual permitió establecer una correlación entre variables a través de un modelo simplificado por experimento. La influencia de las condiciones de oxidación sobre los parámetros físicos y químicos determinados en el drenaje ácido se evaluó a través de un análisis estadístico ANOVA, y se estableció que existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre los tratamientos oxidantes realizados; igualmente, la prueba de Tukey indica que hay diferencias notables entre el valor inicial y el obtenido por cada experimento (Romero, 2016). Por otro lado, el tratamiento de DAM por oxidación registra una ventaja muy valiosa, y es que genera una baja o casi nula generación de lodos que requieran postratamiento y/o eliminación, porque estos agentes oxidantes empleados durante el proceso se descomponen en productos menos tóxicos.

Análisis de impactos ambientales

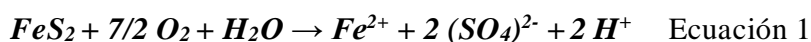
El proceso de formación de los drenajes ácidos de mina inicia cuando los minerales sulfurados como la pirita se exponen a los efectos del oxígeno y el agua. Esto sucede cuando se hace remoción de material como apertura de tajos, túneles, se acopian estériles de mina, se disponen los relaves sin ningún tipo de control. La presencia de aguas ácidas va asociada a explotaciones de sulfuros complejos y la minería del oro y carbón con altos contenidos de pirita. No sólo las minas en actividad pueden provocar efluentes ácidos, sino también, las explotaciones clausuradas, tanto si son a cielo abierto o subterráneas o cualquier otra forma de explotación de yacimientos. Para identificar las fuentes generadoras del DAM, es necesario comprender que los minerales sulfurados están en todas partes en el ambiente geológico, pero se encuentran principalmente en rocas que están debajo de una capa de suelo y, a menudo, debajo del nivel freático (Salazar et al., s.f.).

La generación de DAM tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción de diversos microorganismos que sobreviven en ambientes ácidos y extremos como el de los residuos mineros. *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus* y *Leptospirillum* son microorganismos que están presentes en los sedimentos de los diques de colas y escombreras y utilizan la energía que se libera de la oxidación del hierro para su metabolismo; estas bacterias tienen preferencia por los sulfuros que contienen hierro como la pirita (Kirschbaum y Murray, 2011). La velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio ambiente puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de

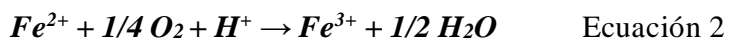
aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno.

Los sulfuros son minerales poco frecuentes en la corteza terrestre. Sin embargo, en ciertas situaciones geológicas la abundancia de estos minerales aumenta, llegando a convertirse en mayoritarios. La pirita (FeS_2) es el sulfuro más común en la naturaleza, encontrándose en formaciones hidrotermales, rocas ígneas y depósitos sedimentarios. Este sulfuro se puede oxidar por mecanismos directos que han sido explicados en distintas investigaciones.

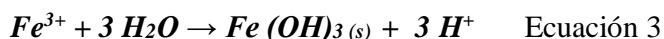
En el trabajo del autor (Ibañez, 2016) se presenta las reacciones de la pirita con el oxígeno para formar sulfato, hierro ferroso e iones hidrógeno, lo cual está ilustrado por la serie siguiente de ecuaciones:



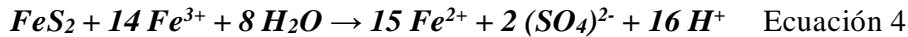
Posteriormente, el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico:



A valores de $\text{pH} > 3,5$ el hierro férrico puede precipitarse en forma de hidróxido férrico, durante la reacción se liberan protones de hidrogeno adicionales:



A medida que se desarrolla la generación de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico actúa como oxidante y promueve la oxidación química de los minerales sulfurosos. En el caso de la pirita ocurre:

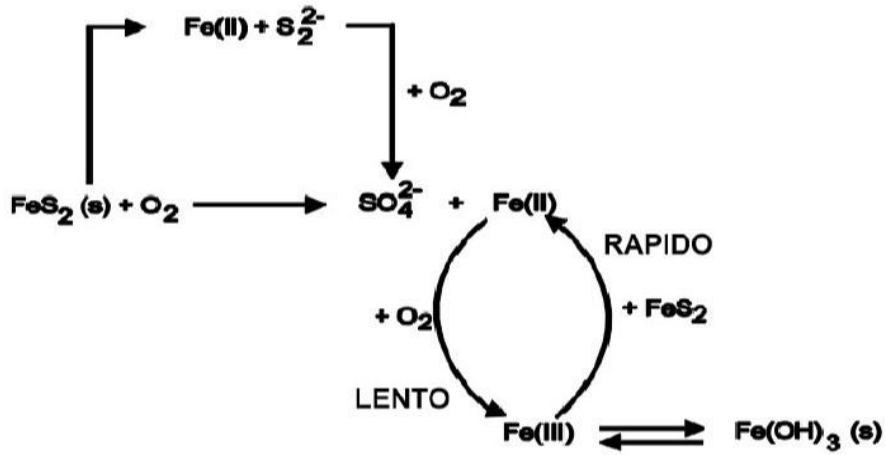


La oxidación vía oxígeno de la pirita (Ecuación 1) es relativamente rápida a valores de pH > 4,5 y más lenta a menor pH. A niveles de pH < 4,5 la oxidación por hierro férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante, el cual sucesivamente, puede atacar otros minerales sulfurados, incrementando la velocidad de oxidación del sulfuro y la generación de productos de oxidación.

Esto contribuye a generar condiciones ideales para el desarrollo de bacterias bajo cierto rango de pH (1,5 y 5) y temperatura (25° y 45°C), actuando como catalizadores y acelerando la velocidad de las reacciones, incrementando la producción de ácido y por ende la lixiviación de metales pesados (Ibañez, 2016).

Al comprender los mecanismos que realizan la oxidación de la pirita, se puede esclarecer como es el proceso de formación de aguas acidas de mina. A continuación, se presenta una ilustración de la formación de agua acidas de mina.

Figura 10. *Formación de aguas acidas de mina.*



Fuente: Aduvire, 2006.

El proceso de formación o generación de aguas ácidas, en su conjunto, también pueden explicar en tres etapas las cuales según el autor Aduvire se describen a continuación:

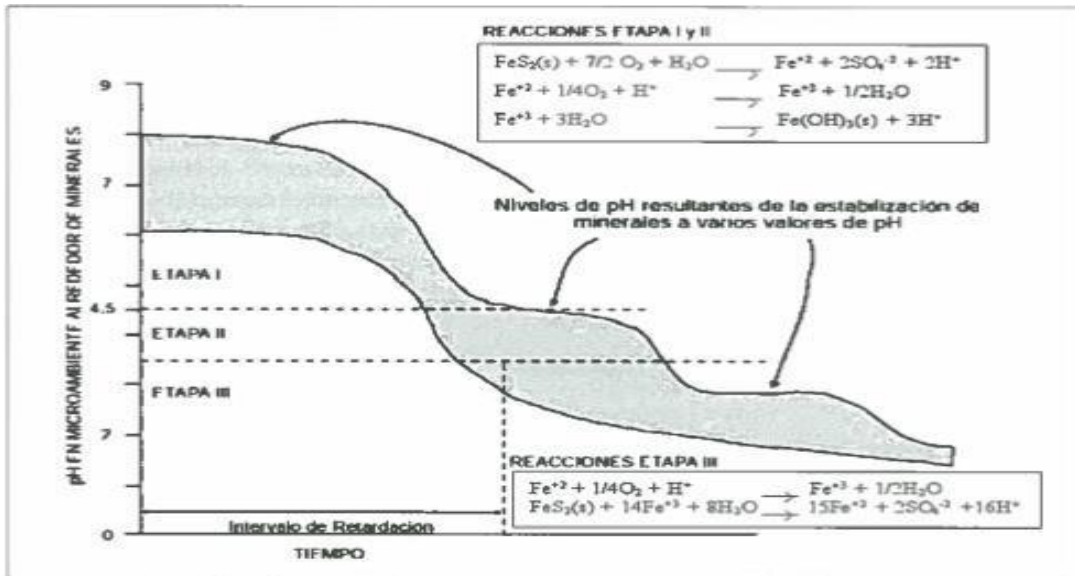
1ª etapa: La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa a indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias. Por lo general, la alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente (Aduvire, 2006).

2ª etapa: La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En la relación se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato

férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto (Aduvire, 2006).

3ª etapa: Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), el ion férrico se ve afectado por las reacciones de oxidación – reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. En resumen, el *Thiobacillus Ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En este momento se producen grandes cantidades de ácido y se deben tener en cuenta los siguientes puntos: - El mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se autocataliza (si se inhibe la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%). 21 - Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación - Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose - Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado 105 y 106 veces respecto al mecanismo directo) (Aduvire, 2006).

Figura 11. *Etapas de la formación de aguas acidas.*



Fuente:(Aduvire, 2006).

Los procesos de generación ácida cambian la composición de los drenajes, reducen o bajan el pH del agua y son capaces de disolver metales pesados contenidos en los mismos. Cuando estos drenajes migran desde los lugares de generación e ingresan al medio receptor, aportan una alta carga de metales pesados que son dañinos para el medio ambiente. La acidificación del agua al estar en contacto con los desechos mineros la convierte en una sustancia capaz de poner y mantener en solución dichos elementos y transportarlos mientras se mantengan las condiciones de acidez. Por esta razón los arroyos y aguas subterráneas ácidos generados en las minas constituyen un riesgo ambiental ya que pueden transportar metales aguas abajo afectando diversos ecosistemas e inutilizar el agua para otros usos (Kirschbaum y Murray, 2011).

El drenaje ácido, se puede producir en la fuente u origen debido a varios factores (minerales sulfurados, oxígeno atmosférico, agua, etc.); luego éste puede ser transportado

en el medio ambiente por medio de las infiltraciones de aguas lluvia y por las escorrentías, acidificándose y/o neutralizándose a la vez y finalmente puede llegar al medioambiente receptor (cuerpos de agua superficiales y subterráneas, flora y fauna) causando posibles impactos. Una serie de reacciones ocurren a lo largo del curso de estas aguas a medida que migran desde la fuente hasta el medio receptor. La clase de agua resultante será determinada por los siguientes factores:

- Naturaleza de los sulfuros
- Disponibilidad y tipo de constituyentes solubles
- Naturaleza del reactante alcalino
- Propiedades físicas del medio y de los residuos.

Tabla 7. Aspectos e impactos ambientales del DAM

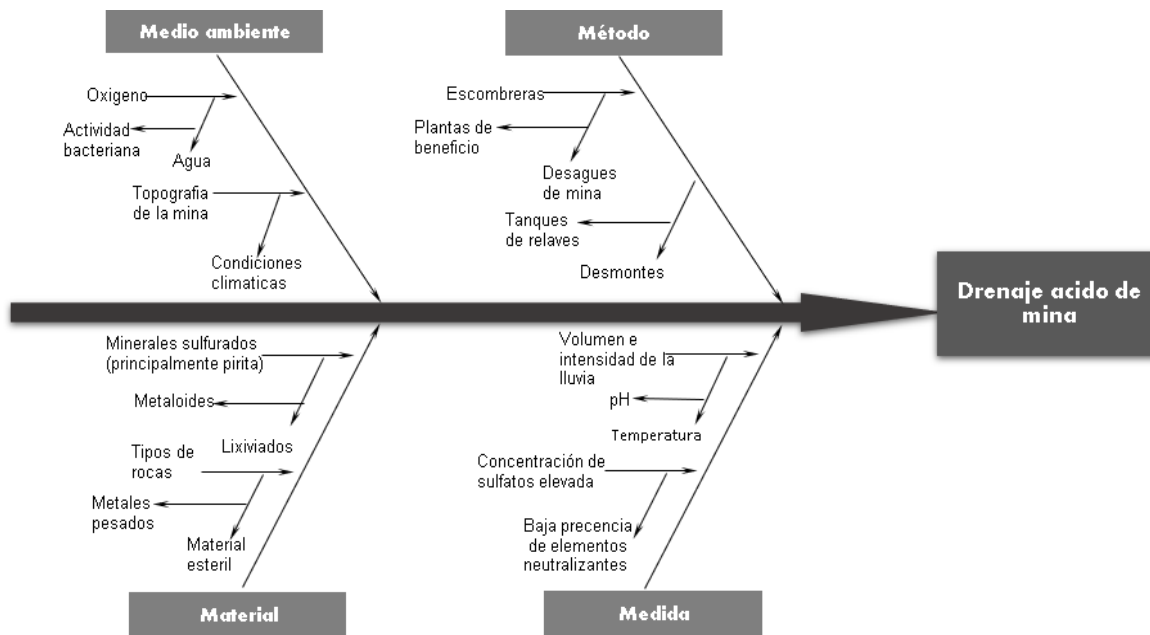
Actividad o proceso	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Desmontes	Generación de escombros. Exposición de sulfuros	Acidificación del suelo. Contaminación de gases y ruido resultante del trabajo de máquinas pesadas
Botaderos de estériles	Acumulación de elementos tóxicos. Sobreocupación del espacio. Alteración de habitat. Exposición de sulfuros	Alteración del suelo. Pérdida de la calidad del agua y suelo. Cambios en el paisaje Pérdida de biodiversidad

Actividad o proceso	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
	<p>Sedimentos en agua y suelos.</p> <p>Inestabilidad física.</p>	
Bombeo	<p>Exposición de metales pesados.</p> <p>Vertimientos.</p>	<p>Cambios en la calidad del agua.</p> <p>Acidificación de las aguas.</p>
Tanques de relaves	<p>Vertimientos y derrames.</p> <p>Acumulación de elementos tóxicos</p> <p>Elevadas concentraciones de metales.</p> <p>Sobreocupación del espacio.</p> <p>Sedimentos en agua y suelos.</p> <p>Inestabilidad física.</p>	<p>Cambios en la calidad del agua.</p> <p>Daños a la flora y fauna.</p> <p>Pérdida de biodiversidad.</p> <p>Acidificación del agua y/o suelo.</p>
Pilas de lixiviación	<p>Vertimientos</p> <p>Acumulación de elementos tóxicos.</p> <p>Elevadas concentraciones de metales.</p> <p>Sedimentos en agua y suelos.</p> <p>Inestabilidad física.</p>	<p>Cambios en el paisaje.</p> <p>Acidificación del agua y/o suelo.</p> <p>Daños a la flora y fauna.</p> <p>Pérdida de biodiversidad</p>

Actividad o proceso	Aspectos ambientales	Impactos ambientales
Desagües de mina	Vertimientos Alteración de habitat. Elevadas concentraciones de metales.	Contaminación a la cadena alimenticia. Mortandad de fauna acuática. Disminución de especies. Cambio en el paisaje. Alteración de habitat.
Perforaciones y voladuras	Generación de escombros. Exposición de sulfuros.	Acidificación de agua y suelo. Contaminación de sólidos y sedimentos. Alteración de habitat. Contaminación visual.

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos mineros afectan a la solubilidad de los metales, así como a la migración de los contaminantes. La movilización de los metales disueltos está controlada principalmente por factores químicos, mientras que los procesos que ocurren a lo largo del camino de la migración están controlados por factores físicos, químicos y biológicos.

Figura 12. Factores influyentes en la generación de DAM.



Fuente: el autor.

Según el autor (García, 2013) los componentes principales para la generación de ácido son:

Minerales de sulfuros: este factor es dependiente de la forma, de la estructura cristalina y como este presente el mineral en el yacimiento, se observarán diferentes velocidades de oxidación.

Microambiente: En el material de roca no saturado, el agua llena pequeños poros y actúa como una película alrededor de las partículas; además, el agua es capaz de moverse rápidamente a través de poros interconectados, fracturas y diaclasas, e incluso ascender por estas si la tensión superficial lo permite. Volúmenes con altos contenidos de pirita y una buena circulación de aire y agua favorecerán una alta producción de acidez.

Agentes oxidantes: El oxígeno es necesario, en ciertos rangos de pH, para la oxidación de los sulfuros de hierro y la generación de Fe³⁺. Esto significa que, si el material con sulfuros de hierro es aislado del aire (oxigenación) o de las soluciones ricas en Fe³⁺, la oxidación puede ser inhibida o disminuida notablemente, impidiendo la generación de aguas ácidas.

pH: A valores de pH entre 4 y 7, la oxidación sin oxígeno de la pirita es lenta y la concentración de Fe³⁺ está limitada por la baja solubilidad de Fe(OH)₃. En sistemas cada vez más ácidos, el ion férrico es cada vez más soluble, oxidando rápidamente a la pirita a valores de pH muy bajos.

Temperatura: A temperaturas bajas, la velocidad de oxidación, tanto química como biológica, es mucho más reducida de lo que podría ser a temperaturas ambientales. En general, la generación de DAM aumenta con el incremento de la temperatura, así el DAM es formado más rápidamente si el material con pirita es calentado.

Bacterias: En muchas situaciones, el control más importante en la generación del drenaje ácido es la oxidación bacteriana del ion ferroso a férrico. Las bacterias que principalmente se desarrollan en este tipo de ambiente son las denominadas *Acidimicrobium ferrooxidans*, *Sulfobacillus acidophilus*, *Acidithiobacillus caldus*, *Leptospirillum ferriphilum*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Acidimicrobium ferrooxidans*, *Sulfolobus metallicus*, *Sulfolobus acidocaldarius*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus caldus*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus acidocaldarius* que a pH

inferiores a 4,5 son capaces de aumentar la velocidad de la oxidación de la pirita, oxidando el ion ferroso a férrico.

Conclusiones

Los drenajes de aguas ácidas de minas y los metales asociados a ellas son un problema ambiental y ecológico de primera magnitud, por lo que existe la necesidad de aplicar tecnologías eficaces y de bajo costo de operación y mantenimiento donde se ha encontrado mayores resultados en la aplicación de tratamientos pasivos en comparación al tratamiento convencional.

Cada yacimiento minero es un caso particular y sus características son únicas, por lo que para cada uno debe idearse una técnica de disposición final de residuos y un plan de cierre que se adecue a las condiciones especiales de cada proyecto minero. Además, es necesario que una vez realizadas dichas tareas, se implemente un sistema de monitoreo constante y permanente para controlar el sitio y efectuar acciones en caso de que no sean eficientes.

A pesar de que Colombia es un país de tradición minera, hasta ahora no se han implementado metodologías que permitan la estimación de las fuentes hídricas con problemas de acidez generados por la industria minera y la información disponible sobre el manejo de DAM es escasa y dispersa, por lo cual un diagnóstico completo y preciso sobre el tema es muy complejo.

La alta concentración de la actividad minera en Colombia y los impactos ambientales propios de la actividad conllevan a grandes desafíos en cuanto a su sustentabilidad, que comprenden cómo extraer en forma eficiente los minerales de interés, minimizando los

impactos al medio ambiente, reconociendo que el impacto más significativo de un proyecto minero es el efecto en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del proyecto.

Los impactos ambientales negativos que desencadenan los DAM pueden llegar a provocar un riesgo sobre la soberanía alimentaria, en particular de comunidades campesinas, étnicas marginadas y con ingresos económicos bajos o que dependen de sus propios cultivos, pues pueden verse afectados por las variaciones que provoca la acidez en las aguas que emplean para sus actividades. A su vez, pueden registrarse dificultades en la provisión de aguas potables para grandes comunidades urbanas.

Las biotecnologías, se han venido exhibiendo como una oportunidad muy viable en términos generales, para el desarrollo de tratamientos efectivos sobre el DAM, Así mismo la optimización de los procesos biológicos de tratamiento con microorganismos ácido-tolerantes representa una fuente de estudio que podría mejorar el costo-beneficio de los procesos de remediación de los recursos hídricos contaminados con DAM.

En el análisis de los tratamientos tanto activos como pasivos, se observó que el manganeso es uno de los metales presentes en el DAM, con mayor dificultad de eliminación en estos drenajes, debido a que por lo general requiere de condiciones específicas para ser removido.

El tratamiento convencional es muy efectivo en cuanto a la neutralización del pH y tiene la capacidad de tratar grandes volúmenes de aguas acidas, pero es un tratamiento con altos costos y que genera subproductos que requiere ser eliminados al ser contaminantes.

En los últimos años es donde se le ha prestado mayor interés a la problemática ambiental que genera los DAM, por esa razón se han aumentado las investigaciones para estudiar los diferentes tratamientos, donde se le apuesta en gran medida a los métodos pasivos, puesto que puede ser formas de manejo más sostenibles.

Se ha identificado que la combinación de algunos de los tratamientos potencializa sus ventajas y beneficios, por ejemplo, la aplicación de cal y piedra caliza, donde se puede obtener mejores resultados, tanto en términos técnicos, de costos y ambientales.

Recomendaciones

Es importante que tanto las compañías mineras como las autoridades competentes efectúen las pruebas suficientes y apropiadas para garantizar que todos los problemas potenciales de DAM hayan sido identificados y tratados.

Plantear estrategias de remediación e idear metodologías de prevención que puedan ser útiles para las presentes y futuras explotaciones mineras.

Realizar procesos de recirculación de aguas para contribuir a la minimización de la contaminación ambiental debida a la formación de drenajes ácidos.

Desarrollar políticas y regulaciones más específicas y estrictas con respecto al drenaje ácido de mina, para prevenir amenazas y efectos que puede provocar afecciones a la salud humana e impactos ambientales.

Incentivar e invertir en investigaciones de tratamientos pasivos y tecnologías innovadoras que mejoren las características de los efluentes mineros.

Disminuir la cantidad de material piríticos expuesto, una buena forma de lograrlo es mediante la utilización como agregados de construcción y se puede emplear en obras del mismo proyecto, por ejemplo, en el cierre de túneles y galerías abandonas.

Referencias bibliográficas

Abinandan, S., Subashchandrabose, S. R., Venkateswarlu, K & Megharaj, M. (2018).

Microalgae – bacteria biofilms : a sustainable synergistic approach in remediation of acid mine drainage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 1131–1144.

Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8693-7>

Adil, A & Tang, H.L. (2018). Field investigations of passive and active processes for acid mine drainage Treatment : Are anions a concern ?. *Ecological Engineering*, 122:

100–106. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.035>. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.035>

Aduvire, O. (2006). Drenaje acido de mina, generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Madrid.

Aguinaga OE, McMahon A, White KN, Dean AP and Pittman JK. (2018).

Microbial Community Shifts in Response to Acid Mine Drainage Pollution Within a

Natural Wetland Ecosystem. *Front. Microbiol.* 9:1445.doi:

10.3389/fmicb.2018.01445

Bahamóndez, C. (2012). Importancia de la actividad microbiológica en la predicción del

drenaje acido de minas (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

- Balci, N & Demirel, C. (2018). Prediction of Acid Mine Drainage (AMD) and Metal Release Sources at the Küre Copper Mine Site, Kastamonu, NW Turkey. *Mine Water Environ* 37:56–74 recuperado desde, <https://doi.org/10.1007/S10230-017-0470-4>
- Banco Central del Ecuador. (2014). Sector minero, Cartilla informativa. [fecha de Consulta 8 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cartilla00.pdf>.
- Baquero, J. C., Rubio, R.F., Verdejo, J y Lorca, D. (2008). Tratamiento de aguas acidas. Prevencion y reduccion de la contaminacion. *Macla*,10(c): 44–47.
- Barón, A. (2013). Caracterización del drenaje acido generado en una mina de oro y propuesta técnica de remediación (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Ben Ali, H., Neculita, C.M., Molson, J.W., Maqsoud, A., & Zagury, G.J. (2019). Performance of passive systems for mine drainage treatment at low temperature and high salinity : A review. *Minerals Engineering* 134, 325–344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.010>.
- Bravo, A., Cano, I., Jofre, R., Gutiérrez, M., y Ramos, Y. (2017). Mass balances in a dam that receives mine drainage. *Procedia Earth and Planetary Science*, (17) , 710 – 713.

Bwapwa, J.K., Jaiyeola, A.T., & Chetty, R. (2017). Bioremediation of acid mine drainage using algae strains : A review. *South African Journal of Chemical Engineering* 24, 62–70. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.06.005>.

Cadillo, E. (2018). *Propuesta de mejoramiento de la calidad de las aguas acidas que drenan del pasivo ambiental de la mina Nuncia mediante el uso de bacterias sulfato reductoras – Ataquero – Carhuaz -Áncash* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

Cadorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (2007). Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. *Scientia et Technica*, 4(36), 849-854.

Chaparro, J y Ruiz, N. (2018). *Evaluación a escala de laboratorio del gradiente de acidez de drenaje acido de mina, mediante el uso de columnas de caliza como sistema pasivo de neutralización* (tesis de pregrado). Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC, Sogamoso, Colombia.

Chaparro, L. T. (2015). Acid Mine Drainage Development and Management. *ESAICA*, Vol.1 n°1, pp. 53-57.

Contreras, A. (2016). Propuesta para el cierre de un drenaje acido de una mina abandonada, ubicada en el municipio de california, departamento Santander, Colombia (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Cubillos, S., Gil, S y Martínez, G. (2016). Historia e institucionalidad en la minería colombiana. *Econografos Escuela de Economía* N° 99. [fecha de Consulta 25 de abril de 2019]. Disponible en:
<http://www.fcenew.unal.edu.co/publicaciones/images/econografos/documentos-econografos-economia-99.pdf>.

De la Cruz Carrasco, E. (2006). Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales. Caso: mina Orcopampa. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 9(17), 69–74.

Díaz, J. (2013). *Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato-Caldas* (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Marmato, Caldas, Colombia.

Dirección de recursos minerales DRM & servicio geológico colombiano SGC. (2016). Mapa de depósitos de minerales de Colombia [mapa]. Recuperado de <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Paginas/Mapa-metalogenico-de-Colombia.aspx>

Dutta, M., Saikia, J., Taffarel, S., Waanders, F., Medeiros, D., Cutruneo, C., Silva, L., & Saikia, B. (2017). Environmental assessment and nano-mineralogical

characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. *Geoscience Frontiers*, (8), 1285- 1297.

Espinosa, M., Arteaga, E., Zambrano, R y González, L. (2010). Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina La Guitarra. *Ingenierías*, Vol. XIII, No. 49, Pag 63-69.

Espinosa, M. A., Hidalgo, A., y Delgado, R. (2016). Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS). *Ingeniería*, 20(2), 65-75. [fecha de Consulta 11 de julio de 2019]. ISSN: 1665-529X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467/46750928001>

Estupiñán, J. C. (2015). Evaluación de un tratamiento para drenaje ácido proveniente de una mina de carbón (tesis de pregrado). Universidad de La Sabana, Chía-Colombia.

Forigua, D., Fonseca, N y Vásquez, Y. (2017). Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica. *Biotecnol. Vo. XIX* No. 1, 92-100

Fundacion Chile. (2015). Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero. Santiago Chile.

Galván, J.L. (2016). *Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

Gamonal, P. (s.f.). Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos [fecha de Consulta 12 de septiembre de 2019]. Disponible en:
<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/DAMhumedales.pdf>

Garay, L.J. (2013). *Minería en Colombia fundamentos para superar el modelo extractivista*. Contraloría General de la República. [fecha de Consulta 9 de abril de 2019].
Disponible en:
<https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2013/05/mineria-en-colombia-fundamentos-para-superar-el-modelo-extractivista2013.pdf>

García, S. (2013). *Modelación del potencial de drenaje ácido de botaderos* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Gelvez, G. A., Laverde, D. A., & Escalante, H. (2008). Remoción de metales pesados de drenajes ácidos de minas de carbón usando bacterias sulfato reductoras. *ION*, 21(1), 71-78. [fecha de Consulta 7 de octubre de 2019]. ISSN: 0120-100X. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3420/342030279009>

Genty, T., Bussière, B., Benzaazoua, M., Neculita, C.M & Zagury, G.J.(2018). Changes in Efficiency and Hydraulic Parameters During the Passive Treatment of Ferriferous Acid Mine Drainage in Biochemical Reactors.

Gomes de Oliveira, V., Tavares, L & Rosalino, M. (2014). Hydrogeologic characterization of the abandoned mining site of Castelejo, Portugal by VLF-EM & RMT-R geophysical surveying. *Geofísica internacional*, 53-2: 135-151

Hallberg, K.B., & Johnson D.B. (2005). Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine. *Science of the total Environment*, 338, 53–66.

Heikkinen, M., Raïsa en, M & Johnson, R. (2009). Geochemical Characterisation of Seepage and Drainage Water Quality from Two Sulphide Mine Tailings Impoundments: Acid Mine Drainage versus Neutral Mine Drainage. *Mine Water Environ*, 28:30–49

Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E., y Lottermoser, B. G. (2011). Mine Wastes: Past, Present, Future. *Elements*, 7(6), 375-380. doi:10.2113/gselements.7.6.375

Ibáñez, P. (2015). Modelación del efecto del drenaje ácido en un depósito epitermal Au-Cu sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneas cercanos (tesis de maestría). Universidad Nacional de la Pampa, Santa Rosa, La Pampa.

INAP, International Network for Acid Prevention. Global Acid Rock Drainage Guide, 2014, 473p. [En línea]. Disponible en:
http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page

Jimbo, A. (2019). Dinámica de la generación de drenaje ácido en los materiales de concentración del proyecto loma larga (tesis de pregrado). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.

Kirschbaum, A., y Murray, J. (2011). Minería y aguas ácidas: contaminación y prevención. *Temas BGNoa*, Vol. 1, N°1, pp. 40-51.

Li Lin, S. (2013). *Medición del Potencial de Generación de Agua Ácida para un Relave en la Zona Central del Perú y sus Necesidades de Neutralización* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

López, M., López, L & Medina, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado Vol. 13 No. 1, 1*, p. 78-91. Recuperado desde
<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de marzo de 2015). Norma de vertimientos. [Resolución 631 de 2015]. DO: 49486.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (2003, agosto). Glosario Minero. Bogotá: s.n

- Monsalve, C.J. (2017). Análisis de las consecuencias ambientales y económicas que genera la minería en Colombia (Tesis de especialización). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Montoya, J. (2015). *Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Moreno, T. (2014). Enriquecimiento de comunidades sulfato reductoras degradadoras de acetato en condiciones ácidas (tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y tecnológica, A, C, San Luis Potosí.
- Ouakibi, O., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2014). Phosphate Carbonated Wastes Used as Drains for Acidic Mine Drainage Passive Treatment. *Procedia Engineering*, 83 (212): 407–414. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.049>.
- Pacheco, L.A, & Domínguez-de-Bazúa, M. C. (2007). Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 22(1), pp. 15-29. [fecha de Consulta 23 de agosto de 2019]. ISSN: 0186-6036. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=482/48222103>
- Panda, S., Mishra, S., & Akcil, A. (2016). Bioremediation of acidic mine effluents and the role of sulfidogenic biosystems : a mini-review. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 1(1), 1–9.

PBI Colombia. (2011). Minería en Colombia: ¿A qué precio?. Boletín informativo no 18.

[fecha de Consulta 2 de marzo de 2019]. Disponible en:

https://www.peacebrigades.org/fileadmin/user_files/projects/colombia/files/colomPBla/111122_boletin_final_web.pdf

Peiravi, M., Mote, S.R., Mohanty, M.K., & Liu, J. (2017). Bioelectrochemical treatment of acid mine drainage (AMD) from an abandoned coal mine under aerobic condition.

Journal of Hazardous Materials, 333: 329–38. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.03.045>.

Peña, J y Pérez, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina DAM (tesis de posgrado).

Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Peretyazhko, T.; Zachara, John M.; Boily, J.-F.; Xia, Y.; Gassman, P.L.; Arey, B.W.; and

Burgos, W.D. (2009). "Mineralogical transformations controlling acid mine drainage chemistry". US Department of Energy Publications . 194.

<https://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/194>

Pérez, N., Schwarz, A., & Urrutia, H. (2017). Tratamiento del drenaje ácido de minas:

estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 53-64.

Pérez, R. (2008). *Tratamiento de drenaje ácido de minas división el Teniente - Codelco*

Chile (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Poveda, P., Córdova, H., Pulido, A., Sacher, W., João de Oliveira, L., Daró, E Y

Marchegiani, P. (2015). La economía del oro Ensayos sobre la explotación en Sudamérica. CEDLA (Ed.)

Rakotonimaro, T.V., Neculita, C.M., Bussière, B., Genty, T., & Zagury, G.J. (2018).

Performance assessment of laboratory and field-scale multi-step passive treatment of iron-rich acid mine drainage for design improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 17575–17589. Disponible en:

<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1820-x>

Ríos, C.A., Williams, C.D., & Roberts, C.L. (2008). Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *Journal of Hazardous Materials* 156, 23–35

Romero, J. (2016). *Evaluación de la oxidación química en el tratamiento del drenaje ácido producto de la actividad minera carbonífera* (tesis de pregrado). Universidad Libre, Bogotá, Colombia.

RoyChowdhury, A., Sarkar, D & Datta, R. (2015). Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. *Curr Pollution Rep* 1:131–141

Salazar, J.P., Hernández, M.L y Arango, A.J. (s.f.). *Alternativas de tratamientos de las aguas de los drenajes ácidos de minas : una revisión*. Capítulo 19, pag 347-366.

Sanchez, J.E y Ferreira, J.P. (s.f.). Drenajes acidos de mina alternativas de tratamiento. Pag 20-33.

Torregrosa, M., Schwarz, A., Nancucheo, I., & Balladares, E. (2019). Science of the Total Environment Evaluation of the bio-protection mechanism in diffusive exchange permeable reactive barriers for the treatment of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 655: 374–383. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.083>

Viana, R. (2018). Minería en América latina y el caribe, un enfoque socioambiental. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2):617-637, recuperado desde <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>

Xie Y, Lu G, Yang C, Qu L, Chen M, Guo C, et al. (2018) Mineralogical characteristics of sediments and heavy metal mobilizationalong a river watershed affected by acid mine drainage. PLoS ONE 13(1):e0190010.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190010>

Zamora, G. (s.f.). Tratamiento fisico-químico de drenajes ácidos de mina: manejo ambiental de lodos de alta densidad – estabilidad – deposición final o aplicacioenes. *Tecnologías Limpias en las Industrias Extractivas Minero-Metalúrgica y Petrolera*, pag 245-258

Zevallos, J. (2016). Estabilización del drenaje ácido de mina (DAM) de la empresa paraíso perdido APATA (tesis de maestría). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.